

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY PÁJENÍ HLINÍKOVÝCH
TRUBEK CHLADÍCÍCH SYSTÉMŮ AUTOMOBILŮ
(RESEARCH ON PROBLEMS OF BRAZING ALUMINIUM
TUBES OF COOLING SYSTEMS CARS)**

Student:

Bc.Michal Rychlý

Vedoucí diplomové práce:

doc.Ing.Ivo Hlavatý,Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Rychlý**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: Řešení problematiky pájení hliníkových trubek chladících systémů automobilů
Research on Problems of Brazing Aluminium Tubes of Cooling Systems Cars

Zásady pro vypracování:

1. Studium problematiky pájení slitin na bázi AL-Mg.
2. Porovnání metod pájení indukčního, plamenem a v peci pro slitiny na bázi Al-Mg.
3. Návrh optimální technologie pájení.
4. Návrh a výběr vhodného pájecího zařízení.
5. Návrh řešení snížení zmetkovitosti na hliníkovém projektu Kühlewasserohre V6 TDI.

Seznam doporučené odborné literatury:

TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvarovania*. Bratislava: ALFA Bratislava, 1989, 384 s. ISBN 80-05-00097-9.
KOLEKTIV AUTORŮ. *Výroba, technická příprava výroby a kontrola svarových spojů*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: ZEROSS, 2002, 417 s. ISBN 80-85771-97-1.
HRIVŇÁK, I. *Teoria zvariteľnosti kovov a zliatin*. Bratislava: Veda, 1989, 344 s. ISBN 80-224-0016-5.
PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu I.*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001, 505 s. ISBN 80-7204-193-2.
PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu II.*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
HLAVATÝ, I. *Teorie a technologie svařování*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, poslední revize 20. 10. 2012. Dostupné z: < <http://fs1.vsb.cz/~hla80> >. ISBN 978-80-248-2414-7.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



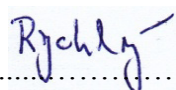
Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

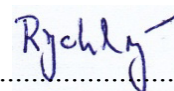
V Ostravě: 15.5.2014


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo –diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15.5.2014



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Michal Rychlý

Adresa trvalého pobytu autora práce: Na Holbě 488, Hanušovice

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

RYCHLÝ, M. *Řešení problematiky pájení hliníkových trubek chladicích systémů automobilů*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2014, 72 s., Vedoucí práce: Hlavatý, I.

Diplomová práce se zabývá řešením problematiky pájení hliníkových trubek projektu Kühlewasserrohre V6 TDI. V úvodní části práce jsou uvedeny vlastnosti hliníkových slitin báze Al-Mn, Al-Mg-Si a Al-Mg a jejich problematika pájení. V další části jsou definovány metody pájení hliníku používaných v automobilovém průmyslu ve vztahu k pájení Al-Mg slitin. V experimentální části je navržena technologie pájení s ohledem na pájení Al-Mg slitin včetně návrhu pájecího zařízení. V další části práce je navržen plán snížení zmetkovitosti na projektu Kühlewasserrohre V6 TDI se zkouškami pájených spojů na vybraných dílech. V závěru práce je uvedeno vyhodnocení projektu.

ANOTATION OF MASTER THESIS

RYCHLY, M. *Research on problems of brazing aluminium tubes of cooling systems in cars*. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2014, 72 p., Thesis, head: Hlavaty, I.

This master thesis deals with resolving of problems of brazing aluminium tubes on project Kühlewasserrohre V6 TDI. The first theoretical section deals with the features of aluminium alloys based on the Al-Mn, Al-Mg-Si and Al-Mg and their problems of brazing. In the next part brazing methods used in the automotive industry in relationship with brazing of Al-Mg alloys are explained. In the experimental part the brazing technology from point of view of Al-Mg alloys is designed followed by the design of brazing machine. The last part deals with the design of a plan for degreasing of scrap on the Kühlewasserrohre V6 TDI project with the tests of brazed joints of chosen parts. In the conclusion of the thesis evaluation of the project is stated.

Obsah

1. Úvod.....	- 10 -
2. Studium problematiky pájených slitin na bázi Al-Mg	- 11 -
2.1 Charakteristika pájených materiálů.....	- 11 -
2.1.1 Slitiny báze Al-Mn.....	- 13 -
2.1.2 Slitiny báze Al-Mg-Si	- 15 -
2.2 Slitiny hliníku báze Al-Mg.....	- 17 -
2.2.1 Tepelné zpracování	- 18 -
2.2.2 Diagram Al-Mg.....	- 19 -
2.3 Vliv významných legujících prvků na vlastnosti Al slitin	- 20 -
2.4 Slitiny hořčíku.....	- 20 -
2.5 Tepelné zpracování slitin hořčíku	- 22 -
2.6 Hořčík a jeho vliv na tvrdé pájení hliníku.....	- 23 -
2.7 Pájky pro tvrdé pájení hliníku a hořčíku	- 25 -
3. Průmyslové metody pájení hliníku a hliníkových slitin.....	- 26 -
3.1 Tvrdé pájení plamenem.....	- 27 -
3.1.1 Ruční pájení plamenem.....	- 28 -
3.1.2 Technika ručního pájení plamenem	- 30 -
3.1.3 Automatizované pájení plamenem.....	- 33 -
3.1.4 Typy pájecích strojů a zařízení.....	- 35 -
3.2 Tvrdé pájení v peci.....	- 41 -
3.2.1 Druhy ochranných atmosfér pro pájení v peci	- 41 -
3.2.2 Pájení v peci Nocolok	- 43 -
3.2.3 Vakuové pece a vakuum	- 45 -
3.2.4 Vakuové pájení hliníku	- 46 -
4. Návrh vhodné technologie pájení.....	- 47 -
4.1 Návrh technologie pro automatizované pájení plamenem	- 48 -
4.1.1 Druhy pájených materiálů	- 48 -
4.1.2 Návrh spoje pájených materiálů.....	- 52 -
4.1.3 Návrh pájky a tavidla pro technologii pájení	- 52 -
4.1.4 Aplikace typu ohřevu	- 54 -
4.1.5 Pájecí přípravky	- 54 -
5. Návrh a výběr strojního zařízení.....	- 55 -
5.1 Princip činnosti	- 55 -
5.3 Provedení pájených spojů	- 58 -

5.3.1 Zkoušky provedené pájením plamenem.....	- 58 -
5.3.2 Vyhodnocení experimentu pájení.....	- 63 -
6. Návrh snížení zmetkovitosti na projektu V6 TDI.....	- 64 -
6.1. Vliv odmaštění dílců	- 65 -
6.2 Vliv aplikace tavidla	- 65 -
6.3 Vliv kompletace dílů před pájením	- 66 -
6.4. Vliv operace pájení	- 66 -
7. Závěr a zhodnocení dosažených výsledků	- 69 -
Poděkování.....	- 70 -
Seznam použitých pramenů:	- 71 -

Seznam použitého značení:

Značení	Význam	Jednotka
R_m	mez pevnosti materiálu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu materiálu	[MPa]
A	tažnost	[%]
D	průměr pájecího kroužku	[mm]
L	délka pájeného spoje	[mm]
G	radiální pájecí mezera na pájecí teplotě	[mm]
g	tíhové zrychlení	[m·s ⁻²]
ρ	měrná hmotnost pájky	[kg·m ⁻³]

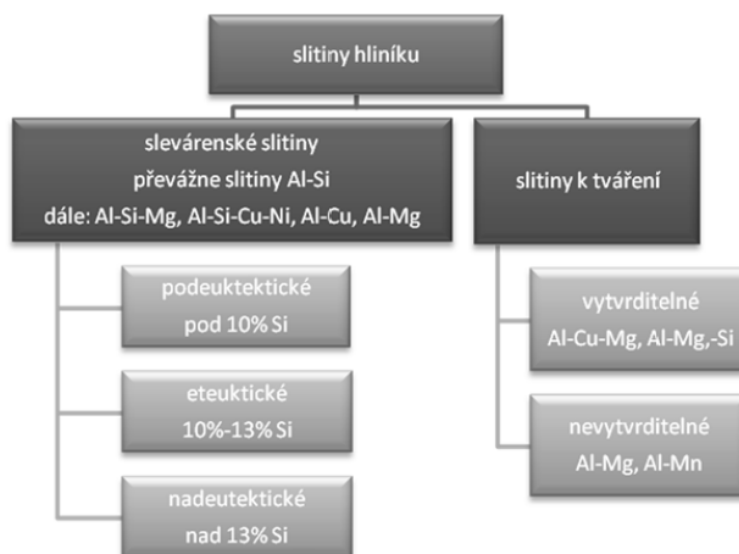
1. Úvod

Počátek 90. let minulého století byl znamením prudkého růstu používání hliníku v automobilovém průmyslu pro klimatizace a systémy chlazení u automobilů. Trend vybavení chladicích systémů a klimatizací automobilů se přesunul směrem od nákladného volitelného příslušenství do fáze, kdy je chladicí systém a klimatizace standardní výbavou i u levnějších rodinných vozů. Hliníkové komponenty z pohledu automobilního průmyslu tvoří až 3/4 ze všech komponent, které se využívají při kompletaci chladicích systémů automobilů. Metody spojování hliníku a hliníkových slitin jsou dnes velmi různorodé. Jednou z metod jejich nerozebíratelného spojování je i pájení, které je stále předmětem širokého výzkumu. Při pájení ovšem vzniká i celá řada problémů, které je nutné řešit. Pájením hliníkových součástí, sloužících zejména jako součásti chladicích systému motorů pro odvodušňování, topení nebo pro olejový systém motorů se věnuje taktéž firma ZKL Hanušovice a.s. Firma se věnuje pájení hliníkových trubek již bezmála 20 let. Výsledný produkt slouží k chlazení automobilů u předních firem automobilního průmyslu, např. AUDI, VW, BMW, Land Rover a jiné. V poslední době firma zaznamenala vysoký nárůst projektů zabývajících se pájením hliníkových dílců právě z Al-Mg slitin. Jejich důvod použití pro chladicí systémy spočívá zejména v jejich výborné korozní odolnosti a taktéž díky jejich mechanickým vlastnostem. Jedním z hlavních cílů této práce je návrh poměrně náročného pájení slitin hliníku konkrétního projektu zahrnující sadu trubek s odlišným chemickým složením hliníkových slitin odlišných komponent. Významným posunem v oblastech pájení hliníku je stále se rozšiřující výzkum slitin báze Al-Mg, který může přinést do budoucna jejich širší využití a nové možnosti aplikací.

2. Studium problematiky pájených slitin na bázi Al-Mg

2.1 Charakteristika pájených materiálů

Hliníkové slitiny patří v rámci aplikací automobilového průmyslu mezi stále žádanější materiály. Jejich přední vlastnosti, mezi které lze započítat jejich nízkou hmotnost, relativně velkou pevnost a odolnost proti korozi z nich dělají vhodný materiál pro použití nejen na karoserii automobilů, ale i jako materiál vhodný na různé druhy součástí, které jsou schopny odolávat dynamickým a tepelným zatížením. Slitiny hliníku lze rozdělit dle jejich způsobu výroby na slitiny slévárenské a slitiny určené k tváření. Obvyklé rozdělení slitin hliníku uvádí obr.1. [1]



Obr. 1 Rozdělení hliníkových slitin [8]

Čistý hliník se vyznačuje teplotou tavení 660 °C a pevností kolem 70 MPa. K dalším vlastnostem hliníku patří dobrá tepelná a elektrická vodivost a jeho odolnost proti korozi. Tloušťka vrstvy oxidu hlinitého je kolem 0,01 μm a poskytuje důležitou ochranu před další korozi. Velikost této vrstvy lze v některých případech uměle zvýšit až na několiknásobek (25 μm) tzv. eloxováním. Hliníkové slitiny využívané pro pájení jsou často omezeny na slitiny, které mají obvykle teplotu solidu vyšší než je teplota zvolené pájky. Pájitelnost různých hliníkových slitin popisuje tabulka č.1. [7]

Tab. 1 Pájitelnost jednotlivých hliníkových skupin [1]

Základní materiál	Pájitelnost	Poznámky
Řada AA 1000	Dobrá	Žádné reálné problémy
Řada AA 3000	Dobrá	Žádné reálné problémy
Řada AA 5000	Omezená	Obtíže s pájením se zvyšují s nárůstem obsahu Mg nad 0,7 %.
Řada AA 6000	Dobrá	Dochází ke ztrátě pevnosti v tahu; vždy zkontrolujte teplotu solidu základního materiálu; je možné stárnutí po pájení
Řada AA 2000	Nedoporučuje se	Pájení vede k nevratnému metalurgickému poškození základního materiálu
Řada AA 7000	Může být velmi obtížné	Pájení s typem AL104 dle normy ČSN EN1044 je nemožné; za zkoušku stojí typ AL201 dle normy ČSN EN1044, ale i ten bude pravděpodobně nevyhovující
Lité materiály		

Významné rozšiřování aplikací hliníku zastává i fakt, že roste výroba široké škály slitin, z nichž je každá charakteristická svými vlastnostmi. Klasifikace slitin podle legujících prvků je uvedena v tabulce č.2.

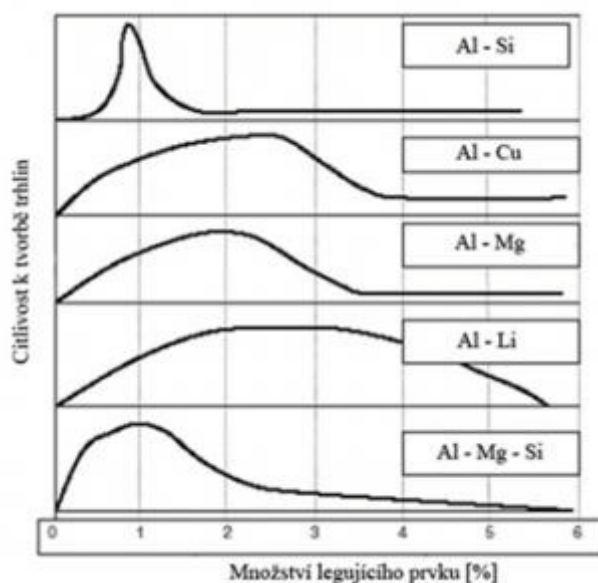
Tab. 2 - Rozdělení hliníkových slitin podle legujících prvků [1]

Série slitin	Popis a hlavní legující prvky
1XXX	99,0% hliník (minimum)
2XXX	Měď (Al-Cu)
3XXX	Mangan (Al-Mn)
4XXX	Křemík (Al-Si)
5XXX	Hořčík (Al-Mg)
6XXX	Hořčík a křemík (Al-Mg-Si)
7XXX	Zinek (Al-Zn)
8XXX	Další prvky
9XXX	Řada nepřirazených slitin

V rámci problematiky pájení v automobilové praxi se využívá zejména slitin řady Al-Mn, Al-Mg-Si a stále častěji také Al-Mg. Rozbor těchto slitin z metalurgického hlediska a jejich vlastností je velmi důležitý pro pochopení jejich chování v průběhu operací pájení. V normách se často uvádí přes 120 druhů slitin hliníku. Vývoj nových slitin se spíše ubírá směrem ke slitinám báze Al-Cu-Li, Al-Mg-Li apod., zejména pro speciální použití v letectví a především v kosmické technice. Z "klasických" slitin hliníku se předpokládá vývoj slitin Al-Mg-Si a Al-Mg a vývoj modifikovaných slitin např. scandiem. [6]

Pájitelnost hliníku a hliníkových slitin je ovlivněna několika faktory, vycházející z jeho specifických vlastností. Nejdůležitější činitele ovlivňující svařitelnost Al slitin jsou [1]:

- velká afinita hliníku ke kyslíku, která zapříčiňuje vznik oxidické vrstvy Al_2O_3
- velký koeficient lineární roztažnosti, způsobující napětí a deformace
- citlivost některých slitin na ohřev a vyvolání precipitačních procesů
- stav zpracování materiálu před pájením
- problematika neměnnosti barvy hliníku při ohřevu



Obr.2 Vliv hlavních legujících prvků na vznik trhlin u jednotlivých typů slitin [12]

2.1.1 Slitiny báze Al-Mn

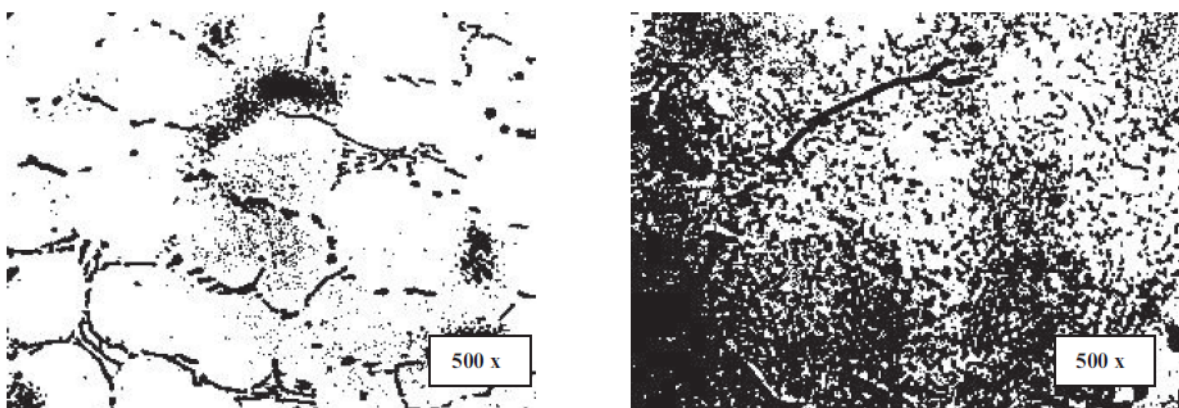
Slitina AlMn1 se řadí do podskupiny slitin hliníku pro tváření, kde patří do tepelně nevytvrditelných slitin, jelikož jejich nevelké přesycení tuhého roztoku umožňuje nepatrné zvýšení pevnosti. Mangan tvoří hlavní legující prvek této slitiny a jeho důležitou vlastností při vlivu na hliník a jeho slitiny je snížení náchylnosti k interkrystalické korozi a korozi pod napětím. Vlastnosti slitin Al-Mn jsou podobné jako u slitin Al-Mg. Průmyslově probíhá výroba pouze slitin AlMn1. [19]

Vlastnostmi jsou slitiny AlMn1 velmi podobné jako pantal (AlMgSi), používá se zejména na trubky a málo namáhané součásti. S obsahem až 1,5% manganu mají přibližně o 20% větší

pevnost než slitiny hliníku patřící do skupiny 1xxx, dle normy ČSN 424432 je tato slitina tepelně nezpracovatelná. Je pevnější než čistý hliník a zachovává si vysokou tvárnost. [7]

2.1.1.1 Tepelné zpracování:

Jedná se o slitiny, u kterých nelze zvýšit pevnostní vlastnosti tepelným zpracováním - vytvrzením. V rovnovážném stavu jsou v matici fáze přítomny intermetalické fáze FeMn_3 , SiAl_{15} a Al_6 . Vzhledem k tomu, že hodnoty elektrodových potenciálů uvedených intermetalických fází jsou blízké elektrodovému potenciálu, se Al slitiny vyznačují vysokou odolností vůči korozi. U slitin typu Al-Mn již při krystalizaci dochází ke vzniku nerovnovážné struktury a je proto nezbytné odlitky podrobit homogenizaci. Ta se uskutečňuje v intervalu 570 - 620°C s pozvolným ochlazováním z teploty homogenizace rychlostí 10 - 20°C až na teplotu 370 - 400°C, nebo časově náročnějším způsobem při teplotách 470 - 520°C. Na obr. 3 lze vidět slitinu EN AW 3103 v litém stavu a stejnou slitinu po homogenizaci 510°C/4 hodiny. Lze vidět, že u původně ~~prosypané~~ matrice ~~dělo~~ k vyloučení intermetalických fází ve formě hrubých precipitátů. [14]



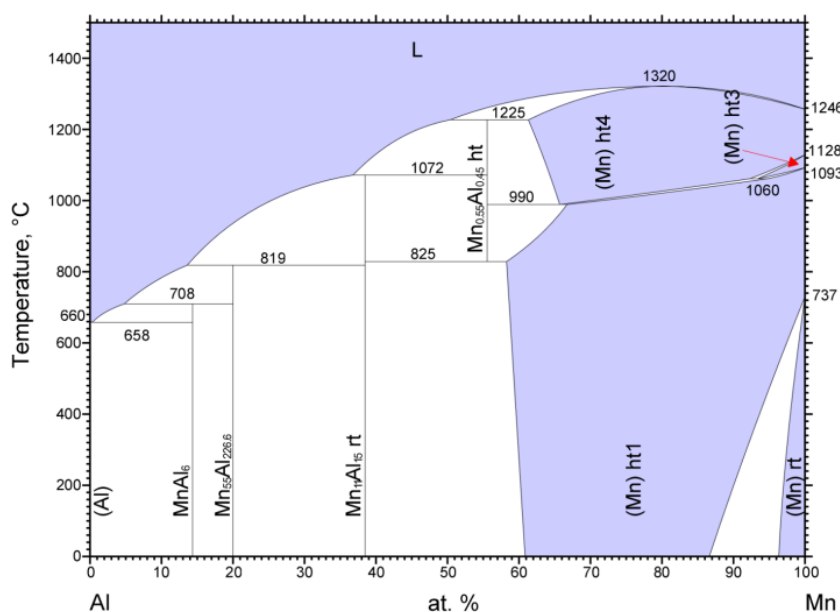
Obr.3 Vlevo slitina EN AW 3103 v litém stavu a vpravo po homogenizaci [6]

Stav materiálu: H: Toto písmeno u materiálu značí netvrzené legování. Pevnosti bylo dosaženo tvrzením. Za tímto písmenem dále následují dvě číslice. První značí způsob dosažení tvrdosti a druhá stupeň vytvrzení.

H111 - materiál žíhaný a mírně deformačně zpevněný[6]

2.1.1.2 Diagram Al-Mn

Vliv manganu jako hlavního legujícího prvku u Al-Mn slitin má významný vliv na pevnost tvářených slitin. V případech, kdy je přítomen ve formě nerozpustných intermetalických sloučenin plasticita obvykle klesá. Dalším důležitým rysem manganu při jeho účinku na hliník a hliníkové slitiny je snížení náchylnosti k intermetalické korozi a korozi pod napětím. V systému Al-Mn dochází k mnoha peritektickým reakcím taveniny Al-Mn za vzniku celé řady fází. V rámci systému Al-Mn existuje řada metastabilních procesů.[6]



Obr.4 Detail diagramu Al-Mn [10]

2.1.2 Slitiny báze Al-Mg-Si

Slitiny báze Al-Mg-Si jsou precipitačně vytvrditelné slitiny, které se široce používají u těch výrobků, kde je důležitá kombinace pevnosti, hmotnosti a odolnosti proti korozi. Patří do skupiny slitin s hlavními legujícími prvky hořčíkem a křemíkem, v těchto slitinách se vždy nachází určitý obsah manganu a železa, případně mědi. Slitina obsahující malé množství manganu do 0,3% mírně zvyšuje pevnost slitiny, naopak vyšší zastoupení manganu ve slitině může způsobit snižování pevnosti. Mangan působí příznivě také z hlediska zjemnění zrna. Obsah hořčíku je nejčastěji v rozsahu od 0,4 do 1,2 respektive 1,5 hm% a obsah křemíku od 0,4 do 1,2%. Množství železa v této slitině se pohybuje od 0,1 až do 0,5 hm% a v tomto

množství je považováno za nečistotu. Vliv manganu a železa, které tvoří slitiny omezeně rozpustné v tuhém základním roztoku základního kovu, je možné z hlediska rovnovážného diagramu řešit jako soustavu tří kovů (hliník hořčík, křemík). Složky hořčíku a křemíku tvoří v binárním systému soustavu Mg_2Si . [6]

2.1.2.1 Tepelné zpracování:

Slitiny této báze jsou schopné vytvrzování v důsledku změny rozpustnosti intermetalické fáze Mg_2Si v hliníku v závislosti na teplotě. Podmínky rozpouštěcího žíhání všech slitin tohoto typu, které z hlediska přibývajícího množství Mg nebo Si lze rozdělit do dvou skupin:

- slitiny s přebytkem Mg. Mají zvýšenou odolnost vůči korozi, zhoršenou tvářitelnost v porovnání se slitinami s přebytkem Si.

- slitiny s přebytkem Si. Mají vyšší pevnostní vlastnosti vůči slitinám s přebytkem Mg a zhoršenou svařitelnost. Teplota rozpouštěcího žíhání se pohybuje okolo 500 - 540°C. Vzhledem k vysoké stabilitě roztoku jsou slitiny "samokalitelné". Prosycený tuhý roztok lze získat i při ochlazování z teploty rozpouštěcího žíhání na vzduchu. Umělé stárnutí probíhá u těchto slitin mezi 160 - 180°C. Homogenizace těchto slitin se uskutečňuje v intervalu teplot 460 - 540°C a volba závisí na chemickém složení dané slitiny. Teplota rekrystalizačního žíhání se provádí v rozmezí 330 - 430°C.[19]

2.1.2.2 Diagram Al-Mg-Si

Systém Al-Mg-Si patří mezi jednodušší typy diagramů. V tomhle systému prvků se s tuhým roztokem nachází v rovnováze sloučenina Mg_2Si . Z kvazibinárního řezu je zřejmá změna rozpustnosti fáze Mg_2Si v tuhém roztoku a možnost vytvrzování vznikem precipitátů GP a β' , které tvoří přechod k fázi Mg_2Si . [6]

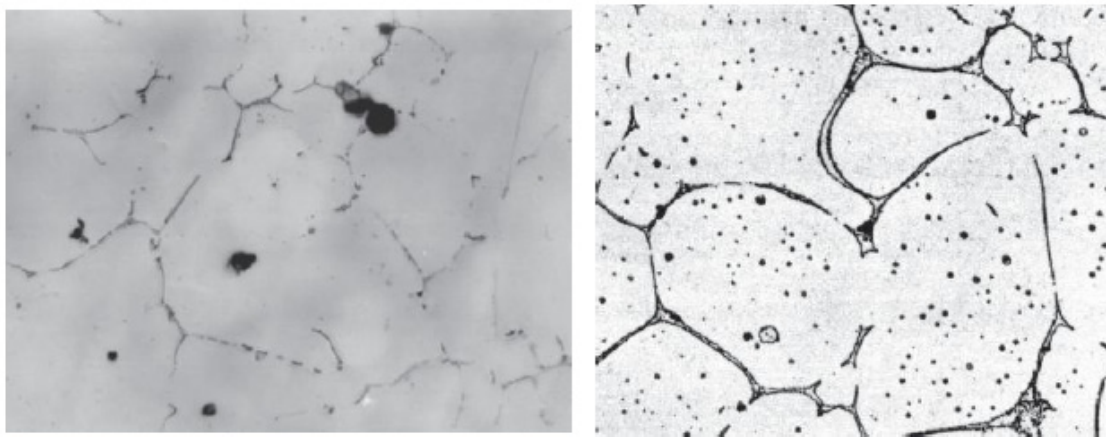
2.2 Slitiny hliníku báze Al-Mg

Slitiny hliníku založené na bázi Al-Mg lze charakterizovat jako slitiny nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi. Jsou to nevytvrditelné slitiny, u kterých nelze tepelným zpracováním zvýšit pevnost ani tvrdost, případně by výsledný efekt byl velice malý. Tento typ slitin lze za studena zpevňovat tvářením. V této podskupině jsou obecně zařazeny slitiny soustav Al-Mg a Al-Mn. Tato skupina se vyznačuje také tím, že neobsahuje měď a proto má velmi dobrou odolnost proti korozi a to i bez povrchových ochran, na druhou stranu je nevýhodou jejich nemožnost je tepelným zpracováním podstatně zpevnit, respektive vytvrdit. Hořčík je zde hlavním legujícím prvkem. Když dojde k vyloučení precipitátu typu Mg_5Al_3 nebo Mg_5Al_8 na hranicích zrn, slitina se stává náchylnou k interkrystalickému porušení a interkrystalické korozi. Mimo to se hořčík podílí především na zvyšování pevnostních vlastností u slitin typu Al-Cu-Mg a Al-Mg-Si. Jejich předností je poměrně dobrá svařitelnost, tvářitelnost, odolnost proti vibračnímu zatížení a dobrá lomová houževnatost. Problém nastává při jejich pájení, jelikož mají špatnou slévatelnost a náchylnost hořčíku k oxidaci v průběhu tavení.[2]

Slitiny báze Al-Mg tvoří řadu $AlMg_2$, $AlMg_3$, $AlMg_5$ a $AlMg_6$. Slitiny s obsahem hořčíku větším než 6hm. % mají sklon ke korozi po hranicích zrn, zejména při mechanickém zatížení, proto se obvykle nepoužívají.[7]

Mezi významné představitele se řadí:

- $AlMg_2$ - slitina používající se v chemickém a potravinářském průmyslu
- $AlMg_3$ - použití při stavbě jachet, přístrojů, tlakových nádob, v automobilovém průmyslu na komponenty teplených výměníků a v potravinářském průmyslu
- $AlMg_5$ - slitina používající se v automobilovém průmyslu na karoserie. Obsah hořčíku zvyšuje pevnost a zajišťuje dobré vlastnosti při nízkých teplotách
- $AlMg_{4.5}Mn_1$ - odolná proti mořské vodě, využití ve stavbě lodí

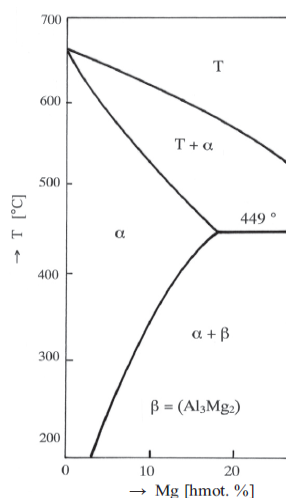


Obr.5 Vlevo mikrostruktura slitiny AlMg₂ v litém stavu a vpravo mikrostruktura AlMg₁₀ vlitém stavu a po tepelném zpracování [6]

Pevnost slitin v žíhaném stavu není příliš velká $R_m=140$ až 200 MPa, lze ji ovšem zvýšit deformačním zpevněním, tedy tvářením za studena, obvykle do $R_{m_{max}}=420$ MPa, které se používají zejména pro slitinu AlMg₅, a to se stupněm deformace 20 až 30%. Při větších deformacích značně klesá tvárnost slitin i jejich odolnost proti korozi. Na rozdíl od slitin Al-Mg, lze slitiny na bázi Al-Mg-Si tepelným zpracováním vytvrdit na $R_m=350$ MPa. Jsou také dobře tvárné a svařitelné, díky vlastnostem křemíku. Jejich použití je zvláště v letectví, ve stavebnictví a v bytové architektuře. [4]

2.2.1 Tepelné zpracování

Slitiny Al-Mg navzdory značné rozpustnosti Mg v Al v tuhém stavu, nelze slitiny této báze vytvrzovat. Odůvodnění lze nalézt ve vysoké nestabilitě roztoku, který se rozpadá již v průběhu ochlazování z teploty rozpouštěcího žíhání, a to i při vysokých rychlostech ochlazování. [3]

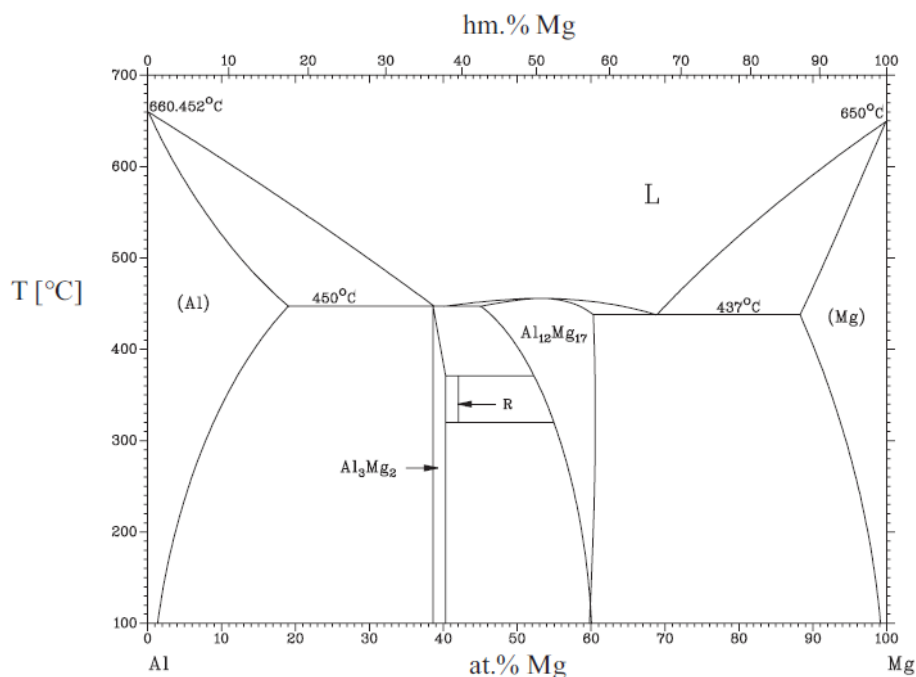


Obr.6 Binární diagram Al-Mg [6]

Optimální teplota rekrystalizačního žhání se u slitin Al-Mg pohybuje v intervalu 300 - 350°C. U slitin pro tváření se nedoporučuje vyšší stupeň plastické deformace za studena než 40 %. Při vyšší deformaci dochází k prudkému snížení odolnosti těchto slitin vůči interkrystalické korozi. [13]

2.2.2 Diagram Al-Mg

Základem důležité skupiny tepelně nezpevňovaných slitin jsou binární slitiny Al-Mg. V binárních slitinách této báze se významně neprojevuje disperzní zpevnění (stárnutí), i když se hořčík rozpouští ve značných množstvích v tuhém roztoku hliníku od cca 17,4 hm% při teplotě 450°C až do 1,9 hm% Mg při 200°C. Hořčík má také významný vliv na zlepšení mechanických vlastností slitin hliníku. Pevnost s přísadou hořčíku postupně stoupá, kdežto tažnost zpočátku klesá a teprve od 3 hm% Mg se mírně zvyšuje. Obsah hořčíku ve slitinách pro tváření nebývá vyšší než 7 hm%. Je to způsobeno tím, že slitiny obsahující vyšší podíl Mg mají horší odolnost proti korozi a zejména mají horší tvárnost. Sklon ke korozi vyvolává sloučenina Al_3Mg_2 , která se vylučuje na hranicích zrn. Slitiny s hořčíkem lze efektivně zpevnit tvářením za studena při zachování vysoké korozní odolnosti i v mořské vodě a i při zachování dobré svařitelnosti. [4]



Obr.7 Binární diagram Al-Mg [6]

2.3 Vliv významných legujících prvků na vlastnosti Al slitin

Z pohledu aplikované fyzikální metalurgie je nutno uvést některé důležité poznatky a vlivy legujících prvků a příměsí na hliník a jeho slitiny.

B - jeho přítomností se zjemňuje struktura, zvyšuje elektrická vodivost u technicky čistého Al v důsledku precipitace V, Ti, Cr, Mo z tuhého roztoku α .

Bi - je legován za účelem zlepšení mechanické obrobiteľnosti.

Sb - zvyšuje odolnost vůči korozi v mořské vodě. Snižuje náchylnost Al-Mg litin ke vzniku trhlin za tepla.

Cr - snižuje náchylnost k růstu zrn u Al-Mg slitin, ztěžuje proces rekrystalizace u Al-Mg - Si a Al-Mg-Zn slitin.

Cu - zvyšuje pevnost vytvrzováním. Snižuje odolnost proti korozi. V technických slitinách je často legován společně s Mg.

Li - legující prvek u slitin Al-Cu-Mg-Li. Jde o slitiny, kde jsou díky přítomnosti koherentních precipitátů LiAl_3 pevnostní vlastnosti i modul E vysoké. Jelikož se jedná o legující prvek s nízkou specifickou hmotností, jsou jím současně legovány "lehčí" slitiny.

Mg - je především legující prvek u slitin Al-Mg. Když dojde k vyloučení precipitátu Mg_5Al_3 nebo Mg_5Al_8 na hranicích zrn, slitina se stává náchylnou k interkrystalickému porušení a interkrystalické korozi. U slitin Al-Cu-Mg a slitin Al-Mg-Si se podílí především na zvýšení pevnostních vlastností.

Mn - mangan je legován za účelem zvýšení pevnostních vlastností, zvýšení teploty rekrystalizace, zjemnění zrna, blokování růstu zrn v případě jeho vyloučení ve formě disperzních precipitátů. Je hlavním legujícím prvkem u slitin báze Al-Mn. [6]

2.4 Slitiny hořčíku

Hořčíkové slitiny mají některé velmi výhodné vlastnosti, ke kterým lze řadit nízkou měrnou hmotnost, pohybující se okolo 1 760 až 1990 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Měrná pevnost je srovnatelná

s obdobnými charakteristikami slitin hliníku i řady ocelí, vysoký útlum vibrací a také velmi dobrou obrobitelností. Druhou stránkou těchto slitin je ovšem obtížnější a nákladnější výroba a zpracování než u slitin hliníku v důsledku vysoké reaktivity hořčíku za vyšších teplot, malá tvárnost za nižších teplot a nízká rychlost difuzních pochodů při tepelném zpracování. Mezi nežádoucí vlastnosti lze zařadit sklon těchto slitin k intenzivní elektro-korozi v kontaktu s většinou kovů a slitin, obtížnější svařitelnost než u slitin hliníku, nízká pevnost ve stříhu ($R_{ms}=120$ až 150 MPa) a nízká vrubová houževnatost $K_u=1,2$ až $4,2$ J, nízká tvrdost a odolnost proti opotřebení a nízký modul pružnosti v tahu $E=42$ až 44 GPa.[3,4]

Slitiny hořčíku rozdělujeme dle následující základní báze:

Slitiny Mg-Al-Zn.

Tyto slitiny patří mezi nejvíce používané slitiny hořčíku známé též pod názvem "elektrony". Hlavním zpevňujícím prvkem je zde hliník, dalším prvkem je zde zinek, který ovšem nemá na zpevnění významný vliv oproti hliníku.

Slitiny Mg-Zn-Zr.

Mají vyšší hodnoty meze kluzu a meze pevnosti v důsledku zpevňujícího vlivu zinku a také zirkonu, který zjemňuje zrna, menší citlivost mechanických vlastností na tloušťku stěny odlitků a menší sklony k mikroporovitosti.

Slitiny Mg-Zn-Nd.

Charakteristiky těchto slitin z hlediska pevnosti obsahujících neodym s růstem teploty klesají pomaleji než u jiných hořčíkových slitin. Z tohoto důvodu je jejich použití jako konstrukční materiál až do teploty 250°C .

Slitiny Mg-Zn-Zr-PVZ.

PVZ u těchto slitin značí prvky vzácných zemin tvořící součást ceriového směsného kovu, obsahujícího minimálně 45 hm% ceru. Slitiny této soustavy mají vlastnosti podobné slitinám s neodymem. Jejich mechanické vlastnosti za normální teploty jsou srovnatelné s hodnotami ostatních slitin hořčíku. Slitiny s PVZ mohou být použity pro dlouhodobou funkci v silově zatíženém stavu do teploty kolem 250°C .

Slitiny MG-Zn-Zr-Th

Jedná se o slitiny s thoriem, které se řadí k hořčíkovým slitinám s nejvyšší žárupevností. Jsou určeny pro dlouhodobou funkci za teplot až kolem 350°C.

Slitiny M-Li

Slitiny hořčíku legované lithiem umožňují vyrábět slitiny s měrnou hmotností nižší, než má čistý hořčík. S růstem obsahu lithia v hořčíkových slitinách pevnost klesá, ale přesto je konstrukčně využitelná zejména u slitin legovaných i dalšími prvky (Al, Zn, Cd a PVZ).

Slitiny Mg-Sm (samarium) a Mg Er (erbium) jsou dosud vývojové materiály.

Slitiny hořčíku jsou ve velké míře využívány pro své specifické vlastnosti v letecké a raketové technice, v menších měřítkách v přístrojové, optické technice, také v jaderné energetice a v automobilovém průmyslu. [4]

2.5 Tepelné zpracování slitin hořčíku

Ve srovnání se slitinami hliníku jsou při tepelném zpracování slitin hořčíku nutné značně delší doby výdrže na teplotách, jelikož difuzní pochody u těchto slitin probíhají mnohem pomaleji. Stárnutí těchto slitin je možné pouze uměle. Způsob tepelného zpracování závisí na složení slitiny a na požadovaných konečných vlastnostech součástí. [13]

Homogenizační žíhání

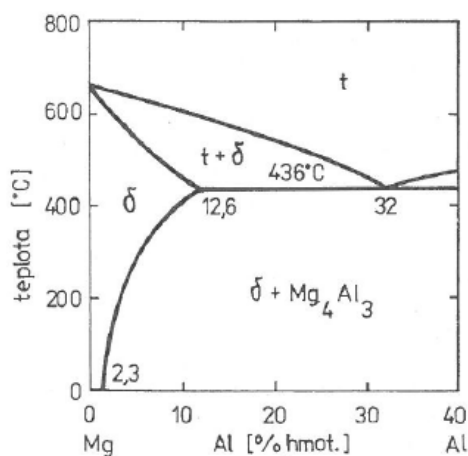
Slouží k odstranění nerovnovážného rozdělení přísadových prvků v objemu slitiny po krystalizaci a tím ke zlepšení pevnostních a tvářecích charakteristik odlitků. Elektron MgAl_8Zn_1 je v litém stavu křehký v důsledku značného množství eutektických částí sloučeniny Mg_4Al_3 vyloučených po hranicích zrn tuhého roztoku α . Po ochlazení odlitku z teploty homogenizačního žíhání je struktura tvořena homogenním tuhým roztokem α a nevelkým množstvím nerozpuštěných minoritních fází, zejména části manganu, který bývá přítomen jako příměs. [12]

- žíhání na snížení vnitřního pnutí

Provádí se po operaci, která způsobuje vznik těchto pnutí. Obvykle jsou to teploty od 235°C až do 290°C.

- rekrystalizační žíhání

má menší význam, jelikož většinu slitin hořčíku lze tvářet pouze za tepla. Provádí se jako mezioperace při tváření slitin hořčíku za studena. Nejčastěji se používá teplota 250°C až 350°C. Vyšší teploty nejsou vhodné z důvodu hrubnutí zrna a zhoršení mechanických vlastností.



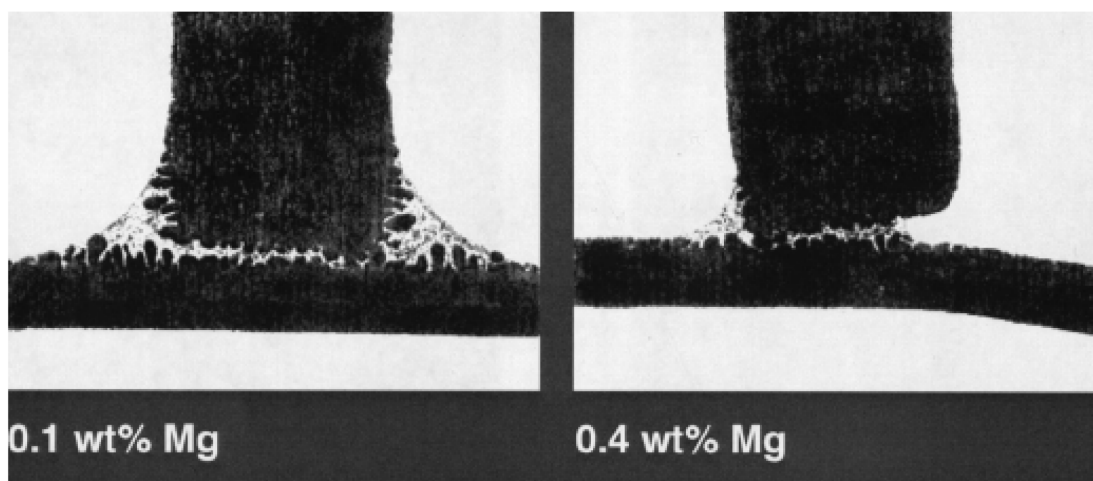
Obr.8 Část rovnovážného diagramu soustavy Mg-Al [13]

Vytvrzování je použitelné jen u slitin soustav, kde nárůst pevnosti je dostatečně velký. Vytvrzování sestává z rozpouštěcího ohřevu a následujícího umělého stárnutí. Zvláštností je možnost ochlazování slitin hořčíku z teploty rozpouštěcího ohřevu volně na vzduchu nebo ve vřelé vodě. U některých slitin je vhodné provádět umělé stárnutí bez předchozího rozpouštěcího ohřevu. [6]

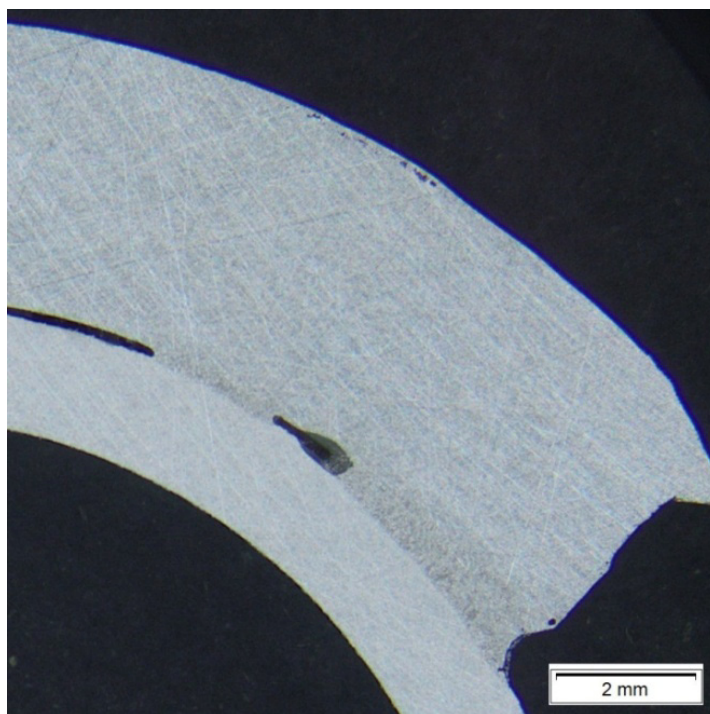
2.6 Hořčík a jeho vliv na tvrdé pájení hliníku

Třída slitin 5xxx, jejichž hlavním prvkem je kromě hliníku také hořčík je potenciálním problémem při pájení. Obsah hořčíku ve slitinách této řady se různě liší. Schopnost zapájet slitiny Al-Mg závisí zejména na obsahu hořčíku a zkušenostech s technikou pájení. Hořčík u těchto slitin významně zvyšuje pevnost, zlepšuje obrobitelnost a výrazně zvyšuje korozní odolnost. Na druhou stranu jeho zvyšující obsah značně ztěžuje jeho pájitelnost. Bylo zjištěno, že obsah hořčíku ve slitinách do 0,5 hm% hořčíku lze pájet všemi běžnými způsoby pájení, tj. (indukční pájení, pájení plamenem i pájení v peci). Pokud je splněna podmínka

obsahu hořčíku do 0,5 hm%, lze při pájení použít nekorozivních tavidel a přesto dosáhnout kvalitních pájených spojů. Obecně se přijímá obsah hořčíku do 0,5% pro pájení v peci, do 1,5% pro pájení plamenem. Při zajištění dostatečně stabilního procesu a vhodné kombinace tavidla a pájky, lze plamenem pájet i slitiny s obsahem hořčíku do 3hm.%. V případě ohřevu těchto slitin začíná hořčík postupně difundovat k povrchu a reaguje s oxidem na povrchu za vzniku $MgO - AlO_3$. Tato difuze je závislá na čase a teplotě a probíhá rychle, pokud je ohřev vyšší než $425^{\circ}C$. Tyto spinelové oxidy mají sníženou rozpustnost v roztaveném stavu. Mimo to tyto oxidy reagují s tavidly na bázi MgF_2 , $KMgF_3$ a K_2MgF_4 , které plní funkci obránce při vzniku těchto reakcí na povrchu materiálu. Z důvodu migrace hořčíku prochází výraznou změnou složení povrchu základního materiálu a tento nově vzniklý materiál vykazuje podstatně vyšší rychlosti oxidace. V oblasti pájení plamenem lze vyšší koncentraci hořčíku tolerovat, jelikož vyšší rychlost ohřevu znemožňuje rozpouštějícímu se hořčíku dostat se k povrchu, aby výrazně snížil účinky na taveninu. Zvýšenou pozornost je nutné věnovat přítomnosti hořčíku v základním materiálu, který při pájení migruje k povrchu a jeho teplota solidu je kolem $616^{\circ}C$. V případě přehřátí hořčíku u pájení je takový materiál náchylný k počínajícímu tavení po hranicích zrn, jehož vnějším znakem je zdrsnění povrchu základního materiálu. Tento efekt je velmi častý a obecně se označuje jako efekt pomerančové kůry. [2]



Obr.9 Rozdíl mezi pájenými spoji tvořenými materiály s obsahem 0,1% Mg vlevo a 0,4% Mg vpravo [2]



Obr.10 Nevyhovující pájený spoj slitiny báze AlMg3 s dutinami uvnitř spoje.

2.7 Pájky pro tvrdé pájení hliníku a hořčíku

Pájky pro pájení hliníku a hořčíku jsou v zásadě založeny na bázi Al-Si binárních slitinách, které jsou omezeny na 7 tříd. Existují různé varianty těchto tříd, ale ve skutečnosti je jejich složení velmi blízko standardizované formě materiálu dle normy ISO 17672: 2010. Existuje taky slitina s označením Mg 001, které se vyznačuje svojí ojedinělostí v použití v USA pro pájení materiálů, které obsahují velmi značné množství hořčíku. Nicméně je zcela nevhodná pro pájení hliníkových slitin. Vhodnost použití určitého typu slitiny závisí na mnoha faktorech, které mohou být ve výsledku požadovány. Nelze jednoznačně říci, že určitý typ pájky je vhodný jen pro určitý typ aplikace. Variabilita technologií pájení vyžaduje určité aplikace, pro které je vhodnější určitý typ pájky. Jedním z nejméně obvyklých faktorů může být skutečnost, že pájka často není aplikována do spoje, ale je zde jako nedílná součást materiálu samotného. Obecně lze říci, že vrstva slitiny pro pájení se nachází pouze na jedné straně hliníku. Tento způsob pájení je zvláště vhodný tam, kde je prováděna výroba hliníkových trubek, deskových výměníků a kondenzátorů. [1]

Class Al: Aluminium and Magnesium Brazing Filler Materials

Code	Composition; % by Mass										Non-Defined		Melting Temperature (Approximate)	
	Si Min/ Max	Fe Max	Cu Min/ Max	Mn Max	Mg Min/ Max	Zn Min/ Max	Cd Max	Pb Max	Others Min/Max	Each Max	Total Max	Al	Solidus °C	Liquidus °C
Al 105	4.5 / 6.0	0.6	- / 0.30	0.15	- / 0.2	- / 0.10	0.010	0.025	Ti - / 0.15	0.05	0.15	Rest	575	630
Al 107	6.8 / 8.2	0.8	- / 0.25	0.10	nil	- / 0.20	0.010	0.025	nil	0.05	0.15	Rest	575	615
Al 110	9.0 / 11.0	0.8	- / 0.30	0.05	- / 0.5	- / 0.10	0.010	0.025	Ti - / 0.20	0.05	0.15	Rest	575	590
Al 112	11.0 / 13.0	0.8	- / 0.30	0.15	- / 0.10	- / 0.20	0.010	0.025	nil	0.05	0.15	Rest	575	585
Al 210	9.3 / 10.7	0.8	3.3 / 4.7	0.10	- / 0.15	- / 0.20	0.010	0.025	Cr - / 0.15	0.05	0.15	Rest	520	585
Al 310	9.0 / 10.5	0.8	- / 0.25	0.10	1.0 / 2.0	- / 0.20	0.010	0.025	nil	0.05	0.15	Rest	555	590
Al 311	9.0 / 10.5	0.8	- / 0.25	0.10	1.0 / 2.0	- / 0.20	0.010	0.025	Bi 0.02 / 0.20	0.05	0.15	Rest	555	590
Al 315	9.5 / 11.0	0.8	- / 0.25	0.10	0.2 / 1.0	- / 0.20	0.010	0.025	nil	0.05	0.15	Rest	559	591
Al 317	11.0 / 13.0	0.8	- / 0.25	0.10	0.1 / 0.5	- / 0.20	0.010	0.025	nil	0.05	0.15	Rest	562	582
Al 319	10.5 / 13.0	0.8	- / 0.25	0.10	1.0 / 2.0	- / 0.20	0.010	0.025	nil	0.05	0.15	Rest	559	579
Al 410	9.0 / 11.0	0.8	- / 0.3	0.05	- / 0.05	0.5 / 3.0	0.010	0.025	nil	0.05	0.15	Rest	576	588
Al 415	10.5 / 13.0	0.8	- / 0.25	0.10	nil	0.5 / 3.0	0.010	0.025	nil	0.05	0.15	Rest	576	609
Mg 001	0.05	0.005	0.05	0.15 / 1.5	Rest	1.7 / 2.3	0.010	0.025	Be 0.0002 / 0.0008	0.05	0.30	8.3 / 9.7	443	599

Obr.11 Pájky pro pájení hliníku a hořčíku [1]

3. Průmyslové metody pájení hliníku a hliníkových slitin

Oblast tvrdého pájení jako průmyslového procesu zaznamenala v posledních 20 letech výrazné změny, kde jedny z největších změn, proběhly v oblasti spojování hliníkových součástí. Dříve se tvrdé pájení ve výrobě prakticky vůbec nevyskytovalo, jelikož byl hliník považován za materiál značně problematický z hlediska tvrdého pájení a rozsah pájecí teploty nebyl obvykle větší než 40°C. Z tohoto důvodu je naprostou nutností přesné řízení teploty procesu tvrdého pájení. V dřívějším zastoupení existovalo v praxi pájení v tzv. "DIP pájení", neboli pájení v solných lázních, které sloužilo ke spojování částí kovů prostřednictvím proudění výplňového kovu na společném rozhraní, kde teplota byla vždy nižší než teplota tavení základního kovu, ale vyšší než 450°C. Přídavný materiál tvoří silné kovové vazby v celém pájeném spoji. V tvrdém pájení hliníku jsou pájky v zásadě z 88% hliníku a 12% křemíku. Další metodou významně využívanou bylo pájení v peci. Z těchto metod se k pájení hliníku využívalo v libovolném rozsahu pouze pájení v solné lázni, ale z důvodů souvisejících

s ochranou zdraví při práci a bezpečností nebyli uživatelé s tímto procesem jako metody používané v průmyslové výrobě spokojeni. Tvrdé pájení v peci s tavidlem zajistilo nezbytný stupeň řízení teploty, ale výpary tavidla, zejména směs par zředěné kyseliny chlorovodíkové a stopy kyseliny fluorovodíkové, vždy způsobovaly značné problémy koroze uvnitř pece. Vakuové pájení natvrdo tehdy stálo na počátku svého vývoje. Pájení natvrdo se využívalo pouze omezeně v leteckých aplikacích, jelikož jeho použití v jiných oblastech než v letectví bylo poměrně nákladné. Od 80.tých let byla stále více zvažována možnost používání hliníku jako konstrukčního materiálu pro výrobu tepelných výměníků do automobilů a byly zahájeny výzkumné projekty v této oblasti. [12]

Při tvrdém pájení hliníku lze použít jakýkoli zdroj, kterým se zvýší teplota spojovaných součástí na pájecí teplotu. V praxi se obvykle volí mezi pájením plamenem a to ručním nebo automatizovaném a pájením v peci. Přestože stále existují případy provádění pájení v solné lázni, použití této metody se snižuje. Jednou z dalších metod, která se v praxi využívá, je indukční ohřev. Tvrdé pájení má proti měkkému pájení i ostatním způsobům pevného spojování součástí mnoho výhod, které přispívají k jeho používání ve výrobě strojírenských součástí. Výhody v používání tvrdého pájení v praxi zahrnují:

- dílce lze vyrábět z většího počtu jednoduchých součástí, čímž se ve srovnání s výrobou stejné součásti z jednoho kusu uspoří materiál
- pájené spoje součástí po pájení nevyžadují velké množství dalších úprav, kde je vhodné zejména kapilární pájení v ochranné atmosféře.
- v hromadné výrobě lze poměrně efektivně tvrdé pájení mechanizovat, respektive automatizovat [16]

3.1 Tvrdé pájení plamenem

Tvrdé pájení plamenem patří mezi nejvýznamnější metody pájení v praxi. Tvrdé pájení plamenem lze rozdělit na dvě základní kategorie, které jsou ruční pájení plamenem a automatizované pájení plamenem. [9]



Obr.12 Pájení plamenem [7]

3.1.1 Ruční pájení plamenem

Jedná se o metodu v praxi využívanou víceméně na kusovou výrobu, případně na opravu pájených spojů. Zvolení používání této metody v praxi zpravidla bývá na posouzení požadavků firmou na výsledný produkt. Časté využití ručního pájení se používá při experimentálním zkoušení pájení hliníkových sestav. Výhoda používání této metody je tam, kde:

- teplota pájení nepřekračuje 800°C
- v aplikacích menších objemů výroby na pájení
- v aplikacích, kde jsou rozměrné díly a těžko dostupné pájené spoje
- v případě malosériových výrobků s odlišnými typy pájených spojů

Pájení plamenem představuje vysoce flexibilní metodu pájení, kde flexibilita procesu je jeho největší výhodou. Nutné je mít na zřeteli, že vysoká flexibilita procesu je úměrně závislá na schopnostech operátora, který provádí danou operaci. Praktické využití metody je spíše vhodné pro různé aplikace oprav a ověřování prototypových dílů ve výrobě s důrazem na zkušenosti operátora. Základním charakteristickým prvkem a jedním z parametrů procesu u pájení plamenem jsou hořáky používané pro pájení. V oblasti pájení hliníku plamenem, je nutné brát zřetel na odlišný přístup k pájení, jelikož pájení hliníku se zásadně liší od pájení dalších kovů. Charakteristický prvek procesu pájení hliníku plamenem je velmi úzké procesní okno a pájky na bázi Al-Si, které je nutné použít, také mají vysokou afinitu ke spojovaným základním materiálům. Existují zde potenciální metalurgické problémy, které se týkají zejména slitin báze Al-Mg. [1]

Mezi hlavní výhody ručního pájení plamenem patří [16]:

- jednoduché zařízení a snadné pochopení jeho činnosti
- rychlost ohřevu je poměrně rychlá
- maximální flexibilita tvaru, velikosti, parametrů ohřevu a pájecích parametrů umožňující

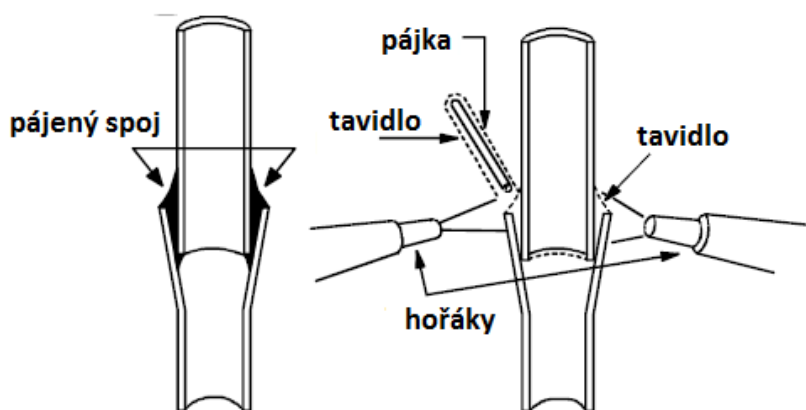
jednoduché i složité operace se sestavami dílců

- minimální investice do technologie
- minimální údržba při používání technologie

Omezení a nevýhody:

- vysoký podíl práce (vysoké náklady)
- pro dosažení konsistentních výsledků nutné zkušenosti
- relativně nízká rychlost výroby
- zdravotní a bezpečnostní faktory

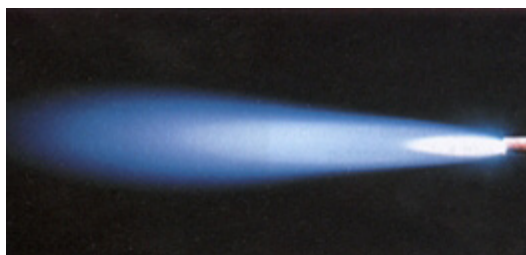
Při pájení plamenem jsou zásadním faktorem používané typy hořáků. Hořáky bývají často vybaveny prostředky (regulátory) pro kontrolu množství topného plynu a kyslíku, přiváděného do trysky hořáku, u pájení hliníku jsou nejvhodnější víceotvorové hořáky. V samotném procesu lze složení plynu, který hoří v trysce hořáku různým způsobem regulovat a tvoří tím parametr procesu, který je plně pod kontrolou operátora. Pokud je v plameni příliš velké množství složky hořlavého plynu (propan) bude to ve výsledku znamenat působení nauhličujícího plamene, kdežto malé množství tohoto plynu vytvoří vysoko oxidační plamen. [12]



Obr.13 Princip pájení plamenem [2]

V případě ručního pájení plamenem platí, že plamen by měl být nastaven na redukční, který je nejvhodnější pro pájení slitin hliníku. Pro dosažení nejlepšího výsledku je zapotřebí upravit plamen tak, aby součásti dosáhly teploty pájení v časovém rozmezí od 30 do 45 s. Tento čas je dost dlouhý na to, aby tavidlo začalo být aktivní a zároveň dostatečný, aby

umožnil pomalý růst teploty a chránil pájené plochy před přehřátím. Pokud je nastavený plamen příliš velký, může vzniknout problém s přehříváním dílů a mohlo by dojít k nežádoucím metalurgickým změnám v materiálu. Malý plamen naopak způsobuje špatně zapájené spoje (studené spoje), kde se nedaří dosáhnout teploty, která je nutná k roztavení přídavného materiálu a jeho vtažení do kapilární mezery. Problematika u pájení hliníku plamenem spočívá též u malého procesního okna pájení hliníku. [1]



Obr.14 Redukční plamen [20]

3.1.2 Technika ručního pájení plamenem

Pájení plamenem obecně probíhá v určitých krocích, které tvoří v zásadě obecný postup pro efektivní pájení plamenem. V následujících bodech jsou shrnuty podstatné body, které tvoří základ pro úspěšnou techniku ručního pájení plamenem.

1. čištění dílů před pájením

Hlavní vliv na kvalitu pájeného spoje má správné a důkladné očištění nečistot z dílů před pájením. Správně odmaštěný díl lze identifikovat při samotném procesu pájení, kde se roztavená pájka rozlévá po povrchu pájeného materiálu, smáčí ho a po určité časové odezvě vytvoří pájený spoj. U hliníku se setkáváme ovšem s dalšími problémy provázející samotný proces. Hliníkové slitiny vytváří na povrchu materiálu neustále se obnovující vrstvu oxidu hlinitého, který je zde přítomen za běžné pokojové teploty. Vzhledem k tomu, že oxid hlinitý v první řadě brání smáčení pájky na povrchu materiálu, je zde nutné jej eliminovat v průběhu pájení pomocí tavidel. Pro pájení plamenem je důležité, aby kapilární mezera nebyla nikdy menší než 0,05 mm a to v každém místě budoucího spoje. [9]



Obr.15 Odmašťovací zařízení Summa [18]

2. Nanesení tavidla na spoje

Tavidla a jejich aplikace tvoří další zásadní krok, nezbytný ke správnému pájení. Tavidla se do pájeného spoje nanáší ještě před započítím samotného pájecího procesu. Další možností může být využití možnosti aplikace pájky s vnitřním obsahem tavidla, kupříkladu pájecího kroužku jako pájky s výplní, kterou tvoří tavidlo. Této možnosti je vhodné využít ještě za použití extra tavidla, které se aplikuje ještě před pájením. U tavidel pro pájení hliníku platí pravidlo, že tavidlo musí být aktivní přibližně při teplotě o 50°C nižší, než je teplota pájení, respektive započítí aktivace teplotou, která otevírá procesní okno pájení hliníku. [14]

3. Sestavení pájených komponent do sestavy

Při sestavování komponent do celku je nutné předem zajistit správnou úpravu pájených ploch. Správná úprava ploch tvoří nezbytnou část procesu. Je nutné, aby součásti byly správně umístěny v místě spoje, který je poslední částí k dosažení teploty pájení. Tímto se zajistí, že roztavená pájka bude smáčet povrch pájených ploch a bude téct skrz spoj, což zajistí efekt kapilarity a teplotní gradient. Jakmile jsou dílce správně sestaveny a zafixovány v přípravku, další množství tavidla by mělo být aplikováno na pájené plochy s pozorností na rohy a ostré hrany spojů. Kde je potřeba speciálních přípravků, je vhodné je navrhnout tak, aby se splnily určité požadavky:

- jednoduché zakládání a vyjímání dílů
- nízká tepelná roztažnost materiálů přípravku
- vyrobeny z žáruvzdorného materiálu
- navrženy tak, aby zabránily přístupu plamene do pájeného plochy
- navrženy tak, aby byl co nejmenší styk dílců s pájecím přípravkem

- navrženy tak, aby se díly co nejméně dotýkaly pájené plochy
- navrženy tak, aby se části pájeného dílce mohly volně pohybovat při roztažení a stažení po celou dobu trvání pájení [2]

4. Ohřev

Vztah ohřevu a pájení je nejvýznamnějším prvkem při procesu pájení. Čím vyšší bude rychlost ohřevu na pájecí teplotu, tím vyšší je pravděpodobnost vzniku přehřátého spoje. Udržování hořáku nepřetržitě v pohybu podporuje ohřev spojů. Nepřímý ohřev pájených ploch je nejefektivnější. V případě použití zemního plynu a stlačeného vzduchu jako plynů pro efektivní pájení je vhodné udržovat trysky hořáků ve vzdálenosti 75 až 100 mm od plochy a tímto lze zároveň dospět k ideálnímu ohřevu. Jak započne proces ohřívání, tavidlo se usazuje a v případě většiny tavidel započiná proces změny vzhledu tavidla k čiré kapalině. Tento okamžik obvykle signalizuje, že součásti se dostávají stále blíže k pájecí teplotě a aplikace pájky do spoje může začít. Pájku je důležité umístit v pevném kontaktu s ústím spoje a měla by se tavit v důsledku vedení tepla z pájených součástí. Důležitý význam tohoto aspektu procesu nebývá příliš zdůrazňován. Ve výsledku je tento aspekt zásadní pro integritu hotového pájeného spoje, kde je pájka roztavena teplotní vodivostí materiálu, a ne už tak významně působením plamene na pájku. Z těchto důvodů je považováno za výhodné aplikovat pájku do pájeného spoje před pájením. Takový materiál poté bude roztaven pouze vedením tepla pomocí pájených materiálů a nebude to pouze výsledkem ohřevu plamene. [10]

5. Chlazení dílů po pájení

Stejně jako při různých formách tepelného zpracování je i u pájení velmi důležitá fáze chlazení zapájených dílů. Poté co byl díl zapájen, začíná chladnout na vzduchu. Jakmile spoj začíná tuhnout a je ochlazen přibližně na teplotu 400°C, může být ochlazen proudem vzduchu a poté vlažnou vodou. Termální šoky, kterým je materiál vystavován ve vodě často způsobují, že jsou nástroji způsobujícími odlupování většiny zbytků tavidla. Tento způsob ochlazování je výhodný, ale je třeba se mu vyhnout v tom případě, kdy jsou pájené materiály charakteristické velmi rozdílnými koeficienty roztažnosti. V těchto případech je možný vznik trhlin v základním materiálu nebo v pájeném spoji. [12]

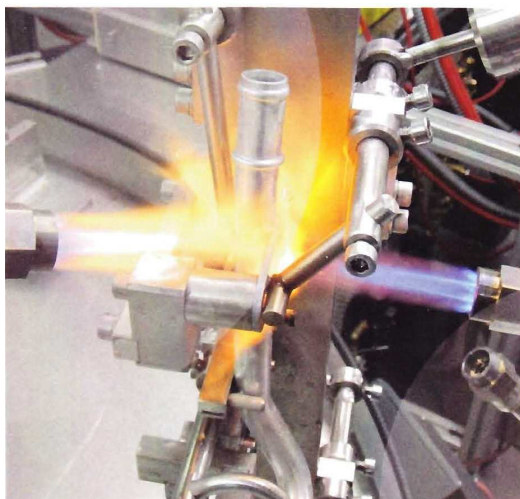
6. Čištění dílů po pájení

V automobilovém průmyslu je často zákazníkem požadována (na zapájených dílech) určité omezené množství nečistot, které jsou kvůli jejich, speciálnímu využití nezbytné. Z těchto důvodů je trendem vývoj čistících zařízení, která jsou schopná zajistit požadovanou

čistotu pájených součástí. Díly, u kterých se při pájení používá korozivního tavidla, což se týká velké většiny procesů pájení, je nutné zbytky těchto tavidel odstranit. Některá tavidla mívají schopnost absorpce vlhkosti ze vzduchu. Výsledný produkt má po pájení kyselý a relativně lepkavý povrch. Tento vedlejší produkt vznikající v procesu pájení způsobuje koroze obou základních materiálů a pájeného spoje. V případě pájení hliníku lze v určitých aplikacích využít nekorozivních tavidel, jejichž zbytky po pájení jsou nekorozivní a není nutné je po pájení odstraňovat. Jejich použití je však limitováno jejich vlastnostmi, zejména teplotním rozsahem jejich funkce a omezením na použití jen u určitých hliníkových slitin. Pro likvidaci zbytků tavidla ulpělých na povrchu pájeného spoje se používají různé metody čištění. Vhodnou metodou je ultrazvukové čištění v lázni se specifickým poměrem složení roztoků kyselin. Po takto provedeném očištění dílců je ještě nutné provést jejich opláchnutí pro odstranění zbytků agresivních složek kyselin. Pro očištění hliníkových dílů je potřeba se vyhnout použití hydroxidu sodného. Hliníkové slitiny a hydroxid sodný spolu navzájem reagují velmi silně a jako vedlejší produkt jejich reakce je generován vodík. [1]

3.1.3 Automatizované pájení plamenem

Automatizované pájení plamenem je jednou z nejrozšířenějších metod tvrdého pájení hliníku v praxi. Jeho aplikace v praxi je dána mnoha výhodami, které tato metoda nabízí, kde spojuje výhody ručního pájení plamenem s různým stupněm mechanizace a různými variantami možností pájení. Při automatizovaném pájení plamenem platí, že čím výše jdeme v hierarchii složitosti procesu, tím vyšší stupeň mechanizace je nutné aplikovat. Velkou výhodou automatizování procesu pájení plamenem je, že parametr trvání procesu pájení je plně pod kontrolou strojního zařízení a je různými způsoby nastavitelný v rámci různých parametrů, tím lze zaručit opakovatelnost kvality výrobku oproti ručnímu pájení plamenem, kde kvalita výrobku jde ruku v ruce s dovednostmi operátora. Další výhody poskytující automatizované pájení plamenem vyplývají z hodinové a denní produkce, kde pokud je zaručen stabilní proces je výsledná produkce velmi efektivní. Skutečnost, že možnost pájení ať už týkající se náběhu teplot, rychlosti ohřevu, či přehřevu je jen jedním z mnoha faktorů, tak mnoho dalších faktorů je nastavitelných taktéž. [2]



Obr.16 Pájený díl na rotačním pájecím zařízení

Hlavní výhody:

- jednoduchá údržba
- vysoká výrobnost
- pružnost procesu s ohledem na tvar součástí a upínání
- vhodné pro vícenásobné spoje
- automatické podávání pájky, tavidla

Omezení a nevýhody:

- přívod tepla je méně rychlý než u indukčního ohřevu
- nevhodné pro pájení nad 1000°C
- složité sestavy podléhají více místnímu přehřátí než v pájení v peci
- větší rozptyl tepla než u indukčního pájení

3.1.3.1 Stupnice rozdělení složitosti automatizovaného pájení

1. Plně automatizované pájecí stroje

- nejkomplexnější plně automatické pájecí strojní zařízení, které mají specifické vybavení k výrobě, kde je schopné pájet i tenčí pájené spoje

2. In-line indexovací pájecí stroje

- stroje zahrnující automatickou aplikaci pájky a tavidla, automatické upínání dílů a vyjímání zapájených dílů s automatickou regulací teplot během pájecího cyklu.

3. Otočné indexovací pájecí stroje

- tyto stroje zahrnují automatickou aplikaci pájky s možností aplikace tavidla pomocí podavačů, automatické odebrání komponent, automatické zakládání dílů a kontrolu řízení(regulace) teplot.

4. Jednoduché otočné indexovací stroje

- stroje vybavené automatickou aplikací pájky a automatickým odebráním zapájených dílů po pájení

5. Kontinuální dopravníkové systémy a kontinuální rotační pájecí stroje

6. Kyvadlové pájecí stroje

- na této úrovni složitosti stroje je systém vybaven nezávislou kontrolou dvou nebo více stanic, regulací teploty komponent a automatickým chlazením vodou. Tyto stroje jsou vhodné pro malé série hliníkových dílů

7. Dvojité kyvadlové stroje

- stroje pracují s nezávislou kontrolou pájecích pozic.

8. Jedno kyvadlové stroje s různým stupněm složitosti

9. Stacionární pole, tvořené ze dvou nebo více hořáků

10. Ruční pájení plamenem [1]

3.1.4 Typy pájecích strojů a zařízení

Stroje a zařízení vhodná pro automatizované pájení plamenem, lze rozdělit do tří základních skupin:

3.1.4.1 Posuvné kyvadlové stroje

Tyto stroje jsou vhodné zejména pro malosériovou a kusovou výrobu, kde se provádí velký počet pájených spojů. Konečný produkt je charakterizován velkou řadou spojů, které jsou různě umístěny po celém dílci, jako je například u rámu horského kola.

posuvné kyvadlové stroje lze dále rozdělit na:

- **stacionární kyvadlové stroje**

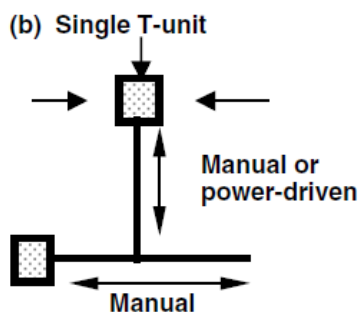
Stacionární kyvadlové stroje jsou tvořeny jednou pracovní stanicí sousedící s pozicí pájení. Operátor připravuje díly pro pájení, aplikuje pájku a tavidlo a poté vloží součásti do přípravku, které jsou namontovány na pracovním vozíku. Vozík je tlačén nebo mechanicky řízen do pájecí stanice, kde se pracovní cyklus zahájí jedním z následujících způsobů:

- a) Operátor stiskne tlačítko, jakmile je vozík připraven na pájení
- b) Cyklus je automaticky zahájen, jakmile vozík dosáhne pájecí stanice. Tohoto způsobu řízení lze dosáhnout více způsoby. Jednou z možností je při montáži aplikovat čidlo nebo spínač v pájecí zóně. Jakmile snímač zachytí přítomnost vozíku, spustí spínač těsně před tím, než vozík dosáhne pájecí stanice. [17]

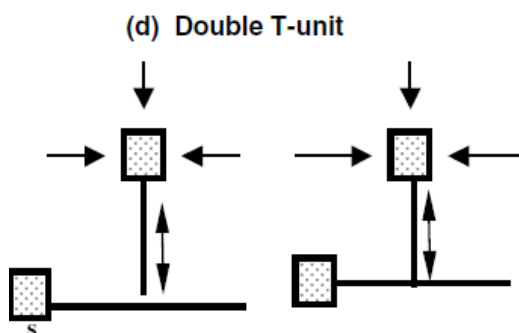
- dvoupolohové kyvadlové stroje

zařízení tohoto typu jsou k dispozici v několika provedeních:

Buď jako stacionární stroje, které jsou upevněny na společném rámu, nebo jako stroje s T- pracovní dráhou, která umožňuje jeden vozík užít na upínání nebo odebírání součástí a druhý použít jako pájecí stanici. Tento princip popisuje obrázek č. 17 a 18. [2]

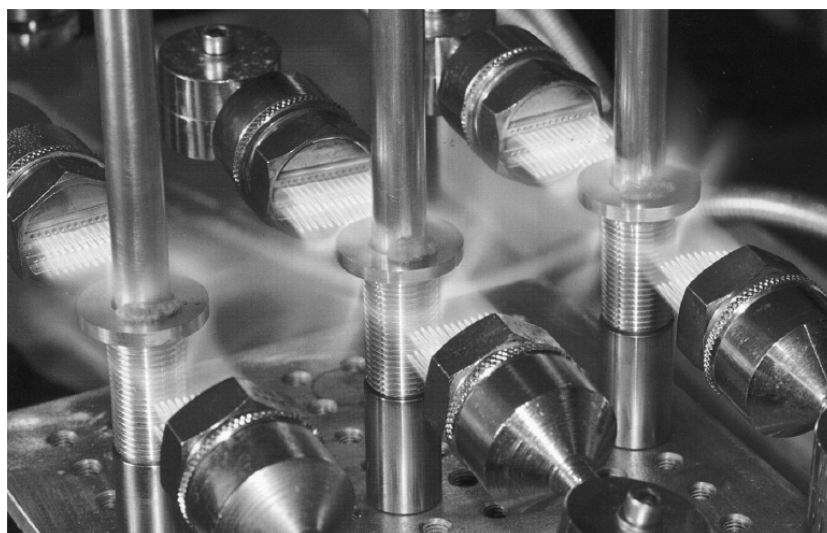


Obr.17 Schéma stacionárního stroje [1]



Obr.18 Schéma stroje s dvojitou T pracovní dráhou [1]

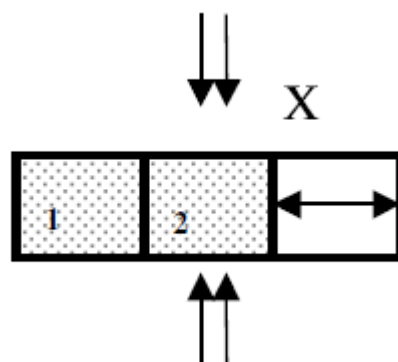
U systémů, které mají dva vozíkové stroje paralelně, je možné zapojit do procesu dva odlišné díly, které vyžadují rozdílné časy pájení na jeden stroj. Toho je dosaženo naprogramováním elektronického kontroléru na stroj tak, aby se pracovní cyklus, který se provádí na trati 1, lišil od cyklu na trati 2. V případech tohoto typu elektrické ovládací obvody stroje, automaticky zajistí příslušný pájecí cyklus, když části dorazí na danou pájecí stanici. Množství ztrátové doby produkce spojené se systémy tohoto typu je minimalizována, vzhledem k tomu, že obsluha bude odebírat pájené dílce a upínat k dílcům k zapájení na první vozík, zatímco druhý vozík bude v pájecí pozici ve stanici. Ideálním příkladem tohoto typu pájení je dvojitý kyvadlový stroj, který je vybaven operativně řízenými hořáky. [12]



Obr.19 Dvojitý kyvadlový stroj vybavený řízenými hořáky [2]

- speciální pájecí stroje

Představitelé nejběžnějších typů těchto strojů jsou specializované kyvadlové jednotky. Tato pájecí zařízení mají dvě pracovní stanice a jednu stanici pájecí. Obě pracovní stanice slouží hlavně pro upínání a odebírání dílců. Zatímco je jedna část pracovního vozíku v místě pro odebírání zapájeného kusu, druhá část se nachází v pájecí stanici. V této situaci je běžné, že na těchto strojích pracuje jeden pracovník, který se pohybuje od jedné pracovní stanice k druhé pracovní stanici. V případě nutnosti provedené přehřevu nebo dohřevu na pracovní stanici, je vhodné zvolit ekonomičtější přístup a pracovat u těchto strojů se dvěma operátory. [12]



Obr.20 Speciální kyvadlová jednotka [1]

3.1.4.2 Dopravníkové stroje

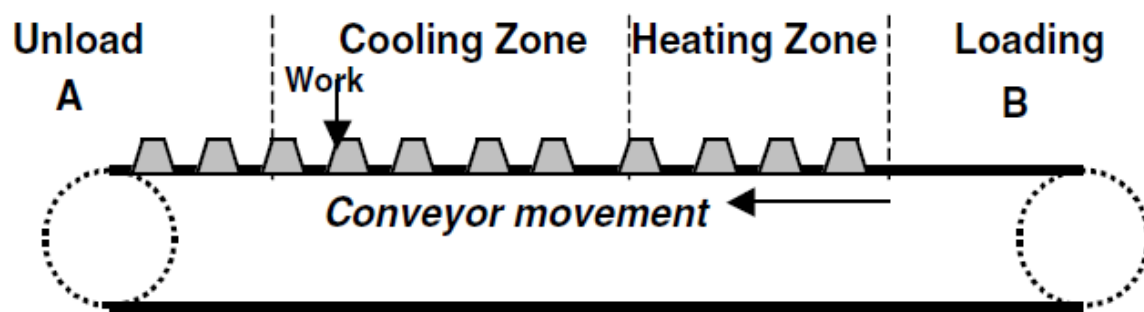
Tento typ pájecích strojů je charakteristický obsahem krokové jednotky sloužící pro indexování součásti nebo kontinuální řízení dopravy po stroji. Rozdělují se do dvou hlavních skupin:

- kontinuální dopravníkové jednotky

Jedná se o zařízení s poměrně vysokou automatizací a nachází široké uplatnění v mechanizovaném pájení malých osově symetrických součástí. Výstupní rychlost je řízena podle počtu dílů, které může operátor sestavit s vložením pájky, aplikací tavidla a umístěním na dopravníkovou plochu v pevném časovém úseku.



Obr.21 Kontinuální dopravní jednotka s hořáky [12]



Obr.22 Schematické znázornění kontinuální dopravní jednotky [1]

Pokud se zaměříme na skutečnost existence mrtvé produkční zóny, neboli neprodukční zóny, její existence není příliš velký problém v případě, že se tento systém skládá z plochých ocelových desek, na které mohou být samoupínací části umístěny. Pokud se použije jednoduchých přípravků, je zřejmé, že přibližně 66% z nich se bude vždy nacházet v neprodukční zóně a nebudou hrát žádnou roli ve výrobní sekvenci. [16]

- krokové řízené stroje - strojní zařízení, které se pro pájení nepoužívají

3.1.4.3 Rotační pájecí stroje

Typ pájecích zařízení pracujících buď v rámci principu indexování, jako krokovací stroje nebo jako kontinuální. Rozdělují se do tří skupin:

a) Kontinuálně otáčecí

Kontinuálně otáčející stroje lze považovat za rotačně se otáčející dopravníkový pájecí stroj. Tento typ strojů vyžaduje mnohem méně přípravků pro upnutí dílců než dopravníkový pájecí stroj. Mimo jiné se tento stroj hodí díky své konstrukci do jakýchkoliv prostor, jelikož je prostorově úspornější než dopravníkový stroj. [2]

b) Manuálně řízené

tyto stroje lze vnímat jako kompromis mezi jednovozíkovými stroji a stroji poháněnými řízenou jednotkou. Obecně platí, že se budou používat tam, kde:

- konstrukce částí je příliš složitá, aby byly vkládány do kontinuálně se pohybujících přípravků

- v aplikacích, kde se požaduje velké množství zapájených kusů, které nelze splnit při pájení na kyvadlovém pájecím stroji. [16]

Manuálně řízené pájecí stroje mají výhodu oproti stacionárním kyvadlovým strojům v produktivitě pájených dílů. Zatímco u stacionárních pájených strojů je nutné díl sestavit, vložit do přípravku a poté zapájet. U manuálně řízených strojů, je vždy jeden díl upnut a druhý odebrán. Tato výhoda se projeví ve větší produktivitě dílců.

c) mechanicky řízené

Při nutnosti pájení velkého množství podobných dílů na vzduchu s nízkou pájecí teplotou pájecích materiálů, je rotační pájecí stroj nejvhodnější volbou. Zejména vhodný je u takových dílců, kde se komponenty manuálně upínají do přípravku a manuálně odebírají z přípravku, při automatické aplikaci pájky během pájecího procesu a je nutné dosáhnout požadovaného množství kusů z jediného stroje. Pro návrh takového stroje je zapotřebí kromě dalších aspektů znát tři hlavní kritéria, která jsou stěžejní při návrhu a výběru tohoto typu strojních zařízení. [17]

Co se týče strojů mechanicky řízených, při jejich návrhu je nutné vycházet z důležitých předem stanovených parametrů, které se dají obecně shrnout do tří hlavních kritérií.

- hlavní parametr je geometrická složitost pájených dílů, která definuje nutný stupeň automatizace navrhovaného strojního zařízení a nastíní základní přístup k technologickému vybavení stroje a technologie pájení dílců

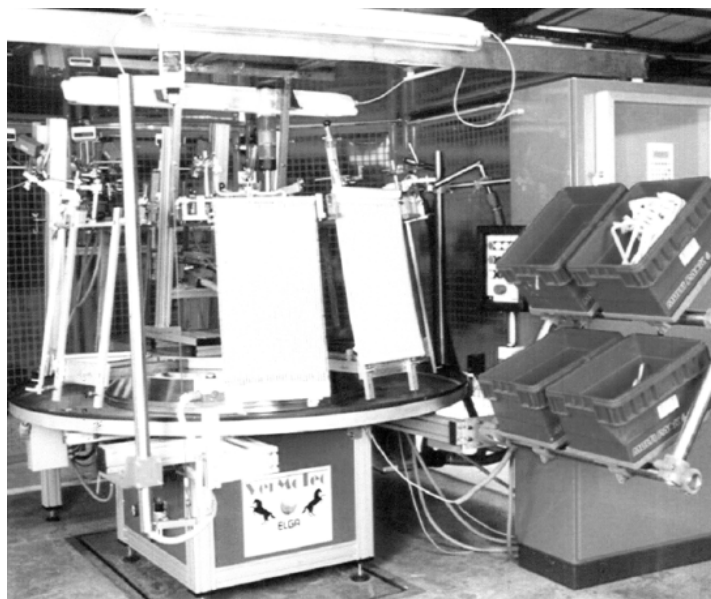
- další kritérium tvoří produkce těchto dílů, dle které je samotný stroj koncipován a vybaven, dále rozhoduje o počtu stanic stroje a dalších náležitostech

- poslední krok je volba hořlavého plynu, který se bude používat. Často to rozhoduje o kvalitě technologie a má také nemalý vliv na cenu provozování. Pro pájení hliníku se nejčastěji vybírá mezi propan-butanem, zemním plynem a případně acetylénem. [1]

Základní koncepcí strojů je určitě otočný karuselový stůl, kde se zpravidla vybírá ze dvou variant:

-stroje , kde je otočný stůl vybaven pouze externě montovanými hořáky, tyto stroje jsou navrženy s průměrem otočného stolu do 450 mm.

- stroje s průměrem stolu větším než 450 mm, tyto stroje mají hořáky umístěny na obou stranách pracovních pozic.



Obr.23 Rotační pájecí stroj společnosti Vermotec [10]

3.2 Tvrdé pájení v peci

Velké množství aplikací v moderních produktivních aplikacích pájení stále zaujímá pájení plamenem. Na druhou stranu nelze opomenout, že v současnosti je velké množství pájených spojů provedeno v ochranné atmosféře při pájení v peci. Redukční atmosféra při pájení v peci se používá zejména pro pájení konstrukčních ocelí a nerezových ocelí, pro pájení slitin na bázi mědi.

Pro pájení hliníku je pájení v peci limitováno nesčetnými faktory. Nicméně pokud jsou splněny podmínky pro pájení hliníkových slitin, lze poměrně efektivně tyto slitiny pájet. Obecně lze v pecích pájet deskové tepelné výměníky, které splňují určité požadavky. [2]

3.2.1 Druhy ochranných atmosfér pro pájení v peci

Pájení v peci se provádí vždy za určitých podmínek a jednou z hlavních podmínek je volba druhu atmosféry, která odpovídá zvolenému typu a způsobu pájení a také určitým pájeným materiálům. Obvykle se provádí vakuové pájení, pájení v redukční nebo neutrální atmosféře. V těchto aplikacích je nezbytné použít tavidla k odstranění povlaku oxidu na povrchu pájených materiálů. Výraznou výjimkou v této normě jsou tepelné výměníky a kondenzátory, které jsou vyrobeny z hliníku a jeho slitin. Tyto postupy jsou obecně známe pod názvem Nocolok proces. V tomto způsobu pájení hliníku je vyrobeno značné množství

pájených spojů v řádech milionů a další různé zařízení jsou ve vývoji. Tento způsob je velmi důležitý pro automatizované pájení hliníku v pecích. [12]

Pájení v peci patří do oblasti kapilárního pájení, při kterém se ohřívá celý objem součásti. Pájení v peci má určité specifické výhody oproti ostatním metodám pájení. Velká výhoda spočívá v možnostech pájení více součástí složitého tvaru s různým počtem spojů najednou. Z důvodu rovnoměrného ohřevu a rovnoměrného chlazení, nevznikají ve výrobcích vnitřní pnutí a deformace. Při pájení v peci lze nastavovat některé parametry, které zajišťují variabilitu procesu pro určitý typ výrobku. Tímto způsobem lze dosáhnout dobré kvality spojů a u většího množství součástí najednou, čímž lze do určité míry zabezpečit opakovatelnost kvality výrobků. pájení v peci lze rozdělit dle druhu použité atmosféry na tři skupiny:

1. Pájení v běžné atmosféře za použití tavidla
2. Pájení v ochranné atmosféře za použití tavidla
3. Pájení v redukční atmosféře

Volba ideální metody pájení v peci závisí na vstupních parametrech, jako je základní materiál, počet a rozměr součástí. Pec jako pájecí zařízení je poměrně nákladné s vysokými pořizovacími náklady. Volba pece pro pájení se tedy volí pouze při pájení velkých sérií výrobků a pokud je vyžadován rovnoměrný ohřev celého objemu součásti. Ve většině případů se tedy používají pece komorové, průběžné s normální nebo ochrannou atmosférou. [2]

Ochranná atmosféra je u pájení v peci tvořena pomocí argonu, helia nebo jejich směsí a dusíkem. Při pájení v peci je plyn vháněn do prostorů pece, ve které je uložena pájená součást, plyn poté pak plní úlohu ochrany povrchu součásti před oxidací. [1]



Obr.24 Pájecí pec pro pájení hliníku [18]

3.2.2 Pájení v peci Nocolok

Od 80-tých let minulého století se vyvíjí poměrně efektivní metoda pájení hliníkových slitin, zejména tepelných kondenzátorů a tepelných výměníků v ochranné atmosféře (CAB). Mezi hlavní výhody této metody pájení patří:

- úspěšné odstranění houževnaté vrstvy oxidu hlinitého, která se nachází na povrchu základního materiálu
- proces probíhá při atmosférickém tlaku
- používá se nekorozivní tavidlo
- není nutné provádět žádná dodatečná zpracování sestav po pájení
- nevyskytují se žádné problémy koroze související s tavidlem
- nocolok je zkratka reflektující reálné podmínky procesu (Noncorrosive locking - nekorozivní zajištění).

V pecích s ochrannou atmosférou CAB se zpracovávají v zásadě dvě kategorie tepelných výměníků:

- tepelné výměníky, u kterých je veškeré pájení na vnější straně
- tepelné výměníky, u nichž je vyžadováno vytvoření alespoň několika vnitřních spojů [12]

Tab.3 Popis vhodnosti jednotlivých typů dílů pro pájení v peci Nocolok [2]

Není nutné vnitřní tvrdé pájení	Je nutné určité vnitřní tvrdé pájení
Chladiče (svařované trubky - švové)	Chladiče (skládané trubky)
Souproudé kondenzátory (extrudované trubky)	Souproudé kondenzátory (svařované trubky - švové)
Jádra ohřívačů (svařované trubky - švové)	Jádra ohřívačů (skládané trubky)
Hadové kondenzátory	Deskové výparníky
Hadové výparníky	Olejoyé chladiče s turbolátory
Mezichladiče (extrudované trubky)	Mezichladiče s turbolátory

Před samotným pájením je nutné u této metody využít jednu ze dvou metod čištění:

- vodní čištění

Při vodním čištění se zvyšuje smáčivost povrchu základního materiálu tavidlem v suspenzi, která se nanáší v další fázi výrobního procesu. Využívá se horkých vodných čisticích roztoků (teploty se pohybují mezi 60 až 80°C). Tyto roztoky bývají často mírně alkalické nebo obsahují průmyslový čisticí prostředek. Roztok se na obrobek nanáší buď ponořením sestavy do nádrže s obsahem roztoku, nebo postřikem. Po proběhnutí první fáze procesu se součásti omyjí v horké vodě a poté se opláchnou jednou nebo vícekrát ve studené vodě. Po dokončení omývání se přebytečná voda z obrobku ofoukne vhodně umístěnými vzduchovými tryskami. [1]

- tepelné odmašťování

Tepelné odmašťování se provádí při teplotách 150 až 200°C. Metodu lze používat jen tehdy, pokud se při tváření a sestavení součástí používají oleje a maziva se schopností vypařování. Pokud se na povrchu sestavy může nacházet směs maziv, je třeba zjistit teploty vypařování daných maziv, aby bylo možné nastavit ideální teplotu pro zpracování.

Další fází procesu je aplikace tavidla. Tavidlo se u tohoto procesu nanáší o minimální tloušťce na každém povrchu určeném k pájení natvrdo. Množství tavidla aplikovaného na součást je důležité, přičemž obecně přijímanou hodnotou je vrstva 5g/m² pro standardní podmínky v pecích. V aplikacích tavidla se využívá nejvíce těchto metod nanášení: [2]

- nízkotlaké stříkání
- zalévání
- máčení
- nanášení štětcem
- vysokotlaké stříkání
- elektrostatická aplikace suchého tavidla v prášku



Obr.25 Pájecí pec Nocolok [2]

Pájení v peci Nocolok je obecně proces, ve kterém nelze pájet hliníkové slitiny s obsahem hořčíku větším než 0,5 hm%. Proces jehož základním principem je používání nekorozivních tavidel nelze využít tedy ani pro pájení slitin báze Al-Mg. Dalším klíčovým bodem je použití této metody výhradně pro pájení zejména deskových tepelných výměníků, kde se používá pájení vnějších případně vnitřních spojů a jejich geometrický stupeň náročnosti není příliš vysoký. Pro pájení trubkových tepelných výměníků je i z tohoto hlediska proces nevhodný případně by se vyznačoval velkými problémy při pájení a v mnoha případech i geometrickými, které by měli vliv na tvarovou přesnost dílů. [2]

3.2.3 Vakuové pece a vakuum

Stupeň úrovně vakua, kterého může být dosaženo, je limitováno počtem parametrů, mezi hlavní parametry se řadí: [1]

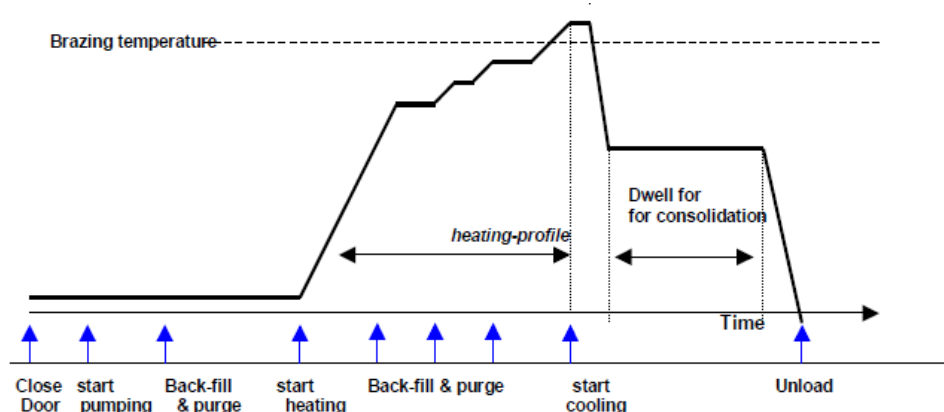
1. Fyzikální vlastnosti materiálu v uzavřeném prostoru
2. Podstata a typ plynu, který má být z prostoru odstraněn
3. Způsob odčerpávání plynu, který je použit



Obr.26 Vakuová pájecí pec [19]

3.2.4 Vakuové pájení hliníku

Vakuové pájení hliníku není tak široce rozšířeno jako pájení Nocolok (CAB) pece. Vakuové pájení hliníku se běžně provádí pomocí slitin, které odpovídají dle normy. Pro vakuové pájení hliníku se používají zejména slitiny hliníku na bázi Al 301 a Al 302 (Al-Si-Mg). Obě z těchto dvou slitin obsahují mezi 1 a 2% hořčíku. Jelikož teplota, při které se musí provádět pájení hliníku není nikdy vyšší než 630°C a hliník má velkou afinitu ke kyslíku, je nutné zabezpečit velmi nízký parciální tlak zbytkového kyslíku. S teplotou pájení, která je kolem 630°C množství diferenciální roztažnosti mezi základním materiálem a jeho oxidem na povrchu bude malé, což znamená malou velikost prasklin ve filmu oxidu. Jeden z možných popisů pájecího procesu vakuového pájení popisuje obr. níže. [11]



Obr.27 Princip vakuového pájení [10]

4. Návrh vhodné technologie pájení

Návrh nové technologie je řešen z důvodu limitního využití kapacit na pájecích strojních zařízeních. Projekt V6 TDI složeným ze 7 dílů hliníkových trubek, které je nutné po technologické stránce připravit pro pájení na vybraném strojním zařízení pro pokrytí roční produkce těchto dílů. K návrhu řešení se setkávají interní zkušenosti s operátory strojních zařízení s využitím teoretických a praktických znalostí problematiky pájení hliníkových slitin. Z důvodů uvedených v předcházejících kapitolách se praktická realizace pájení těchto dílů ve výrobě vyvíjí směrem k automatizovanému plamenovému pájení.

V praktickém hledisku existuje šest základních operací, které musí být při pájení provedeny. Každá z těchto operací vyžaduje svůj specifický čas k dokončení. Jedná se o čas v sekundách.

- čas sestavování
- čas nanášení pájky
- vkládání sestavy do přípravku
- ohřev na pájecí teplotu
- chlazení dílů po pájení
- vyjmutí dílů z přípravku

Při návrhu technologie a výběru strojního zařízení byl brán zřetel na následující charakteristiky procesu:

- produktivitu
- kvalitu výrobků
- vyrobené množství kusů za jednotku času
- schopnost opakovatelnosti procesu

4.1 Návrh technologie pro automatizované pájení plamenem

Samotný návrh technologie proběhl zároveň s návrhem pájecího zařízení. Optimální technologie vychází z předešlých řešení podobných pájených sestav. Kroky, které byly zohledněny při návrhu technologie:

1. Druh hliníkové slitiny, která se bude pájet
2. Pozice základních materiálů v pájeném spoji
3. Pájka a tavidlo, která se bude používat pro pájení
4. Typ ohřevu, který bude aplikován
5. Přípravky pro pájení

4.1.1 Druhy pájených materiálů

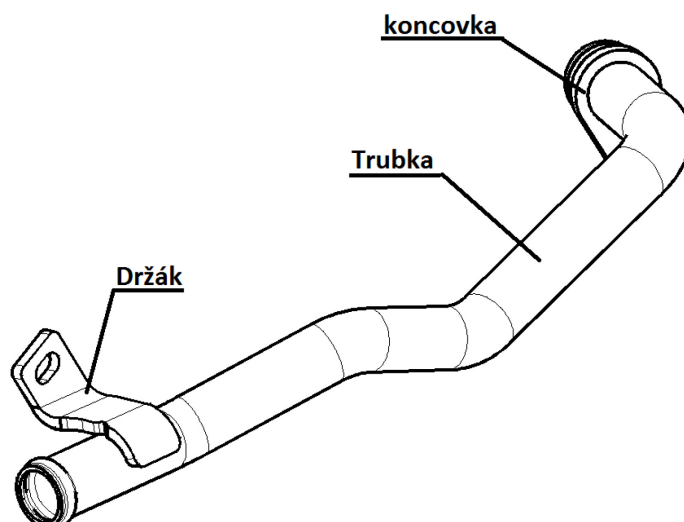
Projekt Audi V6 TDI je charakteristický svým zaměřením na automotive produkci. Volba materiálů je navržena s ohledem na odolnost materiálů vůči dynamickému zatížení, odolností proti korozi a vysokou pevností. Dílce se skládají z kombinace tří skupin materiálů hliníkových slitin. Každá z těchto skupin se vyznačuje charakteristickou vlastností vhodnou pro její konkrétní aplikaci. Při návrhu technologie bylo nutné zvážit, jakým způsobem zajistit kvalitu a efektivitu výroby ve vztahu k pájení s ohledem na pájené materiály. Z hlediska složení komponent z různorodých hliníkových slitin byla zvolena jako nejefektivnější metoda automatizovaného pájení plamenem. Při řešení technologie byla zohledněna problematika pájení slitin Al-Mg. Následující obrázek ukazuje pájitelnost různých slitin hliníku u pájení plamenem.

Tab. č.4 Pájitelnost různých slitin hliníku plamenem [2]

Materiál AA			
Kód	Solidus (°C)	Likvidus (°C)	Poznámky
1070	640	655	Tvrdé pájení nepředstavuje žádné reálné problémy
1145	640	655	Tvrdé pájení nepředstavuje žádné reálné problémy
3003	643	654	Tvrdé pájení nepředstavuje žádné reálné problémy
3005	640	655	Upozornění: Tento materiál může obsahovat až 0,6 % Mg
3102	645	655	Tvrdé pájení nepředstavuje žádné reálné problémy
3105	635	655	Upozornění: Tento materiál může obsahovat až 0,8 % Mg a může být obtížně smáčivý
6061	616	652	Upozornění: Tento materiál obsahuje mezi 0,8 a 1,2 % Mg a jeho smáčení je obtížné, nikoli však nemožné.
6063	616	652	Upozornění: Tento materiál může obsahovat až 0,9% Mg a může být obtížně smáčivý
6951	616	654	Upozornění: Tento materiál může obsahovat až 0,8 % Mg a může být obtížně smáčivý

4.1.1.1 Pájené materiály celku

Mezi materiály celku patří slitiny na bázi Al-Mn, Al-Mg-Si, Al-Mg. Kromě skupiny Al-Mg jsou základní slitiny poměrně dobře pájitelné. Obtížnost a problémy s pájením přicházejí, zejména pokud obsah hořčíku ve slitině překračuje 1,5% Mg. Slitiny báze Al-Mg mají jako hlavní legující prvek hořčík, tímto je dán její vysoký obsah hořčíku pohybující se v rozsahu 2,6 až 3,6% Mg. Vliv hořčíku lze do určité míry tolerovat i s vyšším obsahem, ale je nezbytné zajistit určitá opatření k minimalizaci negativního vlivu hořčíku v průběhu pájení.



Obr. 28 Pájený celek trubky

Materiálové složení jednotlivých dílců je u všech stejné, níže jsou jednotlivé komponenty a jejich materiálová charakteristika rozvedeny.

Materiál trubky:

EN AW 3103 H 111 EN-754-2 (AlMn1) dle ČSN 424232

H111 - materiál žíhaný a mírně deformačně zpevněný

Tab. 5 Obsah prvků ve slitině hliníku EN AW – 3103 (AlMn1) v % hmot. [15]

chemický prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
(%)	0,5	0,7	0,1	0,9 - 1,5	0,3	0,1	0,2	-

Tab. 6 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW – 3103 (AlMn1). [8]

Název vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Mez pevnosti Rm	[MPa]	95 - 130
Mez kluzu Rp 0,2	[MPa]	35
Tažnost (A)	[%]	25

Materiál koncovky:**EN AW 6082 - T6-EN 573-3 (AlMgSi1Mn) ČSN 424400****Stav Materiálu: T6 - zpracováno rozpouštěcím žiháním a uměle zestárnu***Tab. 7 Obsah prvků ve slitině hliníku EN AW- 6082 (AlMgSi1Mn) v % hmot. [15]*

chemický prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
(%)	0,7 - 1,4	0,5	0,1	0,4 - 1	0,7 - 1,2	0,25	0,2	0,1

Tab. 8 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW- 6082 (AlMgSi1Mn) [8]

Název vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Mez pevnosti R _m	[MPa]	295
Mez kluzu R _p 0,2	[MPa]	250
Tažnost (A)	[%]	8

Materiál příchytky:**EN AW 5754 H22 EN 485-2 (AlMg3)**

H22 - Tvrzeno na vyšší stupeň tvrdosti než je požadovaný konečný stupeň a následně zpracováno úpravou žiháním na požadovanou tvrdost. Materiál je také 1/4 tvrdý.

Tab. 9 Obsah prvků ve slitině hliníku EN AW- 5754 (AlMg3) v % hmot. [15]

chemický prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
(%)	0,4	0,4	0,1	0,5	2,6 - 3,6	0,30	0,2	0,1

Tab. 10 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW- 5754 (AlMg3) [8]

Název vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Mez pevnosti R _m	[MPa]	220 - 270
Mez kluzu R _p 0,2	[MPa]	130
Tažnost (A)	[%]	10

4.1.2 Návrh spoje pájených materiálů

Spoje pájených materiálů jsou dány výkresem vytvořeným dle konstruktéra, na základě kterého se posléze volí základní materiály a navrhnou pájecí přípravky. Návrhy spojů se řídí několika pravidly:

- volba materiálů, které mohou vzájemně vytvořit pájený spoj
- efektivní postavení základních materiálů v pájeném spoji
- vhodně zvolený typ pájky pro vytvoření ideálního spoje
- vhodná metoda pájení k vytvoření spoje

4.1.3 Návrh pájky a tavidla pro technologii pájení

Pro pájení hliníku plamenem byla použita pájka L-AlSi Fluxamat. Jako tavidlo bylo dle dřívějších zkušeností s podobnou technologií zvoleno tavidlo AFP Firinit 200.

Tavidlo AFP Firinit se používá pro pájení hliníkových slitin, složení pájky s vhodným tavidlem je mezi 11 - 13% Si. Aktivace tohoto tavidla začíná při teplotách od 575 - 585°C, pájecí teplota vhodná pro tavidlo AFP Firinit je od 590 - 600°C.

Tab. 11 Obsah prvků v pájce L-AlSi Fluxamat.

chemický prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
(%)	12±1, 5	max. 0,5	max. 0,55	max. 0,01	max. 0,35	max. 0,1	max. 0,55	max. 0,2

Každá dávka této pájky je dokladována osvědčením dle EN 10204 3.1.

Vzhledem k tomu, že je velký počet pájených spojů stále vyráběn ruční aplikací pájky, v případě pájení koncovek na trubku se jedná o pájecí kroužek, je pájka aplikována do spoje a poté přesunuta zařízením k operaci přehřevu, jsou tendence tyto způsoby aplikace pájky mechanizovat.

V případě pájení projektu V6 TDI probíhala aplikace pájky u koncovky ručně. Pájka byla umístěna na místo spoje, který dosáhne jako poslední teploty pájení. Tímto způsobem se zajistilo, že pájka bude při dosažení teploty solidu vlivem kapilarity a teplotního spádu vtažena do pájecí mezery a vytvoří pájený spoj. Určitý vliv měla i poloha spoje v přípravku, kde se významným způsobem na vytvoření spoje podílela i gravitace.

Dalším důležitým bodem byla volba průměru aplikované pájky do spoje, kde existují 2 možnosti jak ideálně stanovit průměr pájky. Jednou z variant je provedení zkoušek a na základě vyhodnocení prostřednictvím vizuální zkoušky nebo destruktivními zkouškami pomocí řezů stanovit ideální průměr. Další možností je provést výpočet.

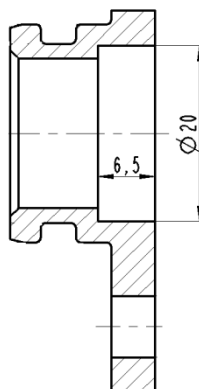
Optimální průměr výplňového materiálu stanovuje rovnice:

$$D = 1,27 \cdot \sqrt{L \cdot G}$$

kde: D= průměr pájecího kroužku v mm

L= délka pájeného spoje v mm

G= radiální pájecí mezera



Obr. 29 Pájená koncovka dílce

V případě koncovky dle Obr.29 je postup volby následující:

$D = 1,27 \cdot \sqrt{6,5 \cdot 0,175} = 1,643 \Rightarrow$ Vhodný průměr pájky je 1,7mm, ale použít lze i průměr 1,6 mm.

Při volbě pájky se počítalo s délkou spojů a se šířkou kapilární mezery, které bude dosaženo při kalibraci konce trubky. Kalibrace trubky se pohybovala v horním rozhraní doporučené tolerance. V případě trubky průměru 20 mm byla zajištěna kalibrace konce trubky přibližně na 19,85mm. Při provádění experimentu byla vzata v úvahu ovalita konce trubky.

V případě pájení držáků na trubku bylo využito podavačů instalovaných na pájecím karuselu. Průměr drátu závisel na typu provedení spoje. Další možností je předem připravený drát pájky, který kopíruje pájený spoj a je aplikován na pájené místo dílce.

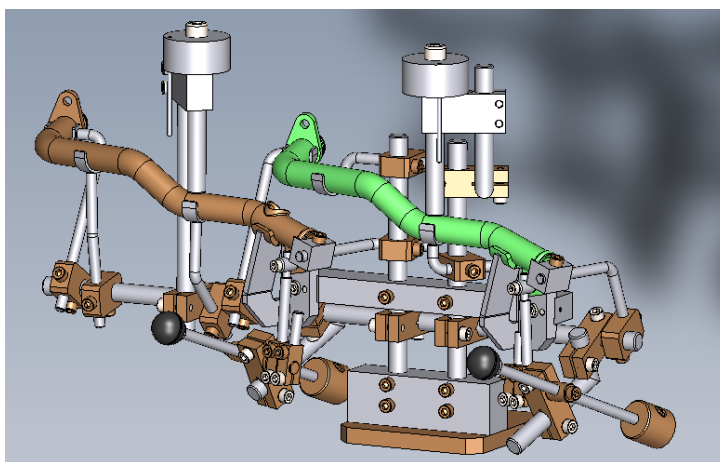
4.1.4 Aplikace typu ohřevu

Jako nejvhodnější typ ohřevu pro pájení trubek báze Al-Mg byl zvolen ohřev plamenem. Při průběhu pájení díly vykazovaly nedostatečné zatékání pájky do mezer. Hlavní příčinou bylo nedokonalé kalibrování konce trubky.

4.1.5 Pájecí přípravky

Nejjednodušší typy spojů jsou ty, kde jsou komponenty sestaveny a vzájemně zajišťují polohu vůči sobě, čímž není potřeba žádných externích přípravků. V případě pájení trubek projektu V6 TDI bylo nezbytné použít pájecích přípravků. Pájecí přípravky navrženy pro pájení těchto typů trubek a splňují následující požadavky:

- splňují kritérium pro snadné zakládání a vyjímání dílců
- jsou navrženy s ohledem na minimální kontakt s pájenými místy a nepůsobí jako tepelný pohlcovač
- navrženy tak, aby se dotýkali části pájených komponent co nejdále od pájeného spoje
- mají nízkou tepelnou vodivost
- splňují požadavky na expanzi a kontrakci dílů
- jsou vyrobeny z žáruvzdorného materiálu



Obr. 30 Příklad pájecího přípravku pro projekt V6 TDI

5. Návrh a výběr strojního zařízení

Nezbytným krokem potřebným k řešení návrhu je nutnost stanovit možnosti, kterými daný podnik disponuje a zohlednit požadavek na stupeň automatizace pájecího zařízení.

Jako nejvhodnější zařízení pro pájení bylo zvoleno rotační pájecí zařízení Vulkanomat EMRC 1200/4 z těchto důvodů:

- z kapacitního hlediska optimálním způsobem pokrývá potřeby projektu
- zařízení Vulkanomat je vybaveno variabilně nastavitelnými hořáky
- kontrola procesu je zajištěna pomocí pyrometrů, kontrolujících teploty procesu pájení
- zařízení je koncipováno pro kapilární pájení

Pro pokrytí kapacitního využití byly dle kalkulace vybrány 3 pájecí stroje Vulkanomat typu EMRC 1200/4.

5.1 Princip činnosti

Rotační pracovní stůl automaticky přenáší pájené součásti přes 4 pracovní stanice. V každé operaci je aktivní jedna složka systému na dané operaci současně (obr.31).

1. stanice - zakládání/odebírání dílů

- pracovník odebere zapájenou sestavu a zakládá novou sestavu dílců k zapájení, sestavením příslušné komponenty do pájeného celku (obr.32).
- po založení nového dílu ručně aplikuje tavidlo na spoje, případně vloží pájku

2. stanice - přehřev

- v této operaci je instalována sada hořáků, kde vnitřní dva hořáky jsou umístěny na pneumatické hořákové rampě a vnější dva hořáky jsou upnuty na pneumatických sklíčidlech
- čas cyklu začíná, jakmile jsou dílce dopraveny do stanice
- ve stejný čas, se hořáky přesunou ze své klidové polohy vůči pájené sestavě a probíhá ohřev z nízké intenzity plamene do vysoké intenzity plamene.

3. stanice - pájení

- při pájení se využívá dvou sad hořáků, vnitřní čtyři hořáky jsou umístěny na pneumatické otočné hořákové rampě a vnější 4 hořáky jsou umístěny na pneumatických sklíčidlech

- čas cyklu začíná, jakmile je sestava dílců dopravena do stanice

- ve stejný čas, se hořáky přesunou ze své klidové polohy vůči pájené sestavě a probíhá ohřev z nízké intenzity plamene do vysoké intenzity plamene.

Pájení s automatickým podavačem drátu:

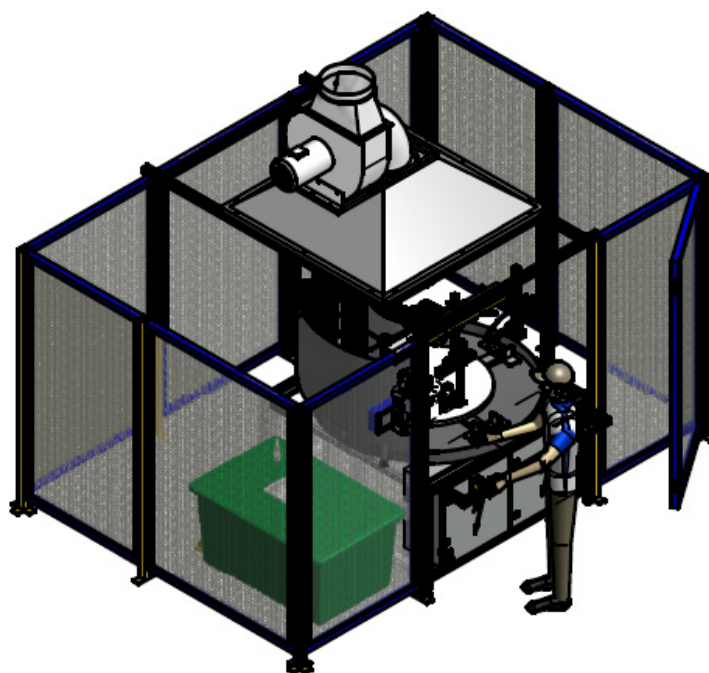
- automatický podavač pájky se přisune k pájené součásti, jakmile je dosaženo teploty pájení a dle programu dávkuje pájený spoj pájkou v souladu s předem zvoleným nastavením času a rychlosti dávkování

- po skončení operace se hořáky přepnou do režimu nízké intenzity plamene a spolu s podavači se přesunou do výchozí pozice

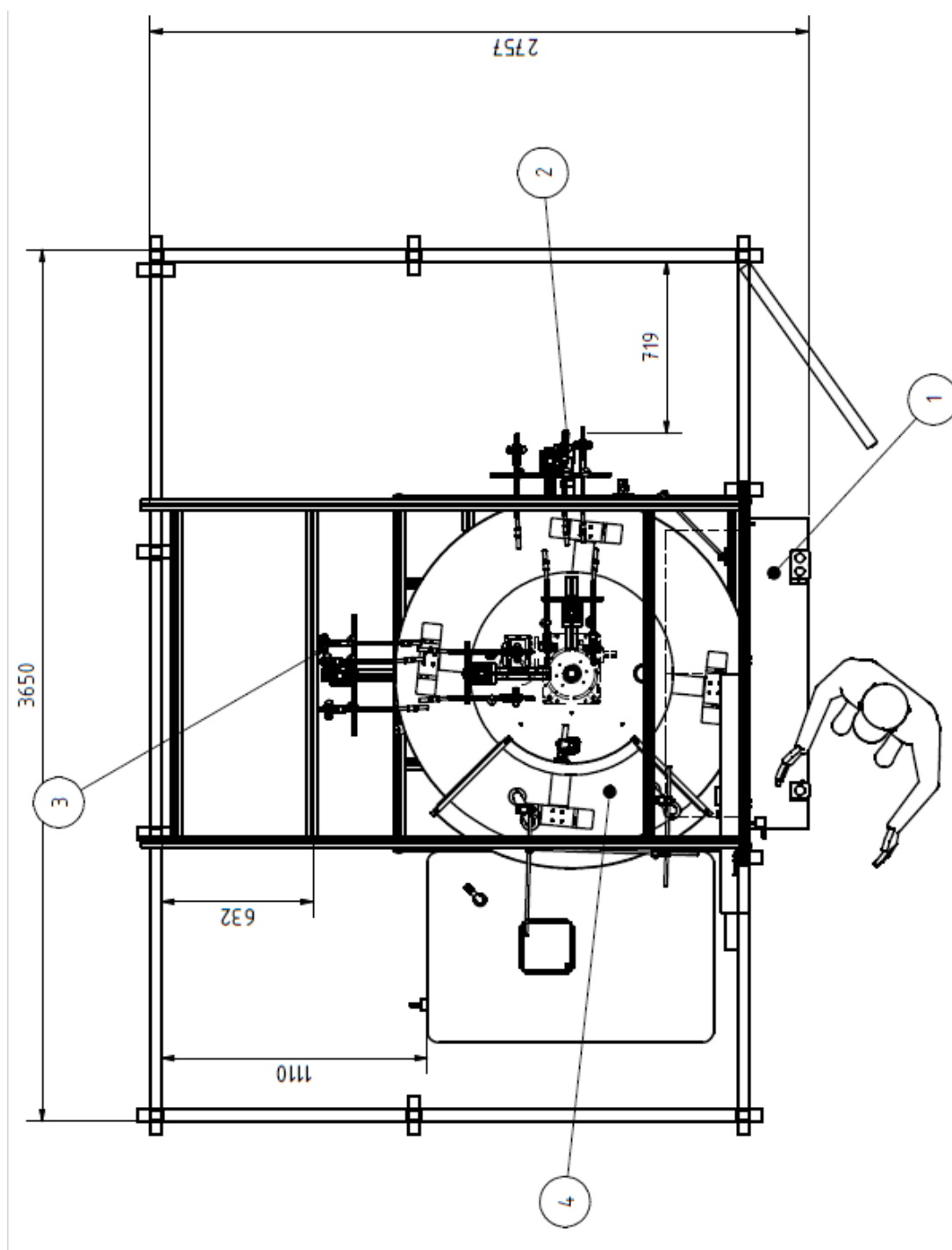
4. stanice - chlazení stlačeným vzduchem a vodou

- čas cyklu započne , jakmile jsou zapájené díly ve stanici

- sestavy se zalijí vodou a poté se otáčí do 1. stanice k odejmutí z přípravku



Obr. 31 Ilustrační model pájecího stroje



Obr. 32 Schematické znázornění vybraného pájecího stroje, pracovní pozice stroje jsou označeny čísly 1 až 4.

5.3 Provedení pájených spojů

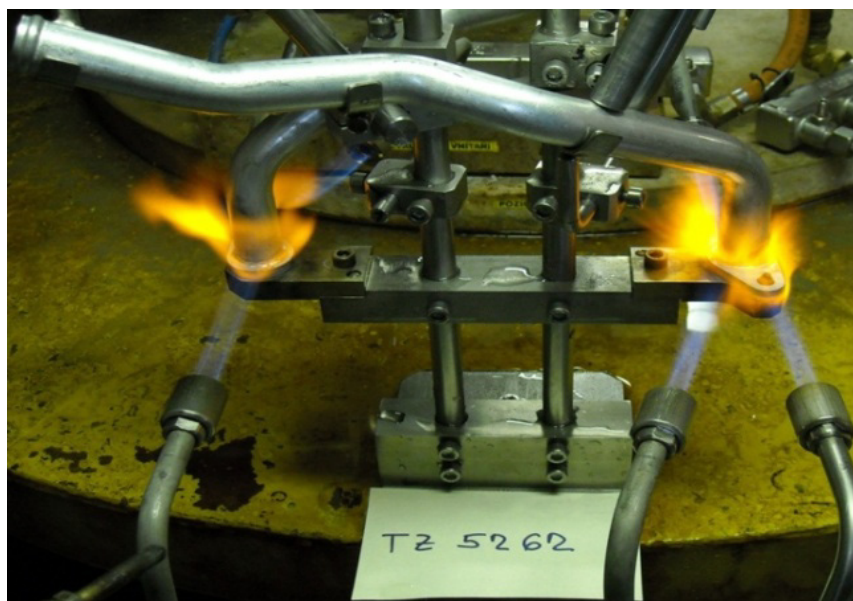
Provedení experimentu pájení projektu V6 TDI bylo uskutečněno na vybraném pájecím zařízení, kde proběhlo v průběhu týdne několik experimentů s pájením dílců.

Požadavkem experimentu bylo dosažení vyhovujících pájených spojů trubek, které se po zapájení vyhodnocovaly dle normy ČSN EN ISO 18279. Chemické složení a mechanické vlastností trubek viz tab. 5 až 10. Experiment se prováděl na rotačním pájecím karuselu založeném na principu kapilárního pájení plamenem. Jako tavidlo bylo zvoleno tavidlo AFP Firinit, jako pájka byla zvolena pájka na bázi AlSi12 Fluxamat. Před provedením experimentu bylo třeba nachystat pájené dílce s úpravou jejich konců pro kapilární pájení, pomocí kalibrace.

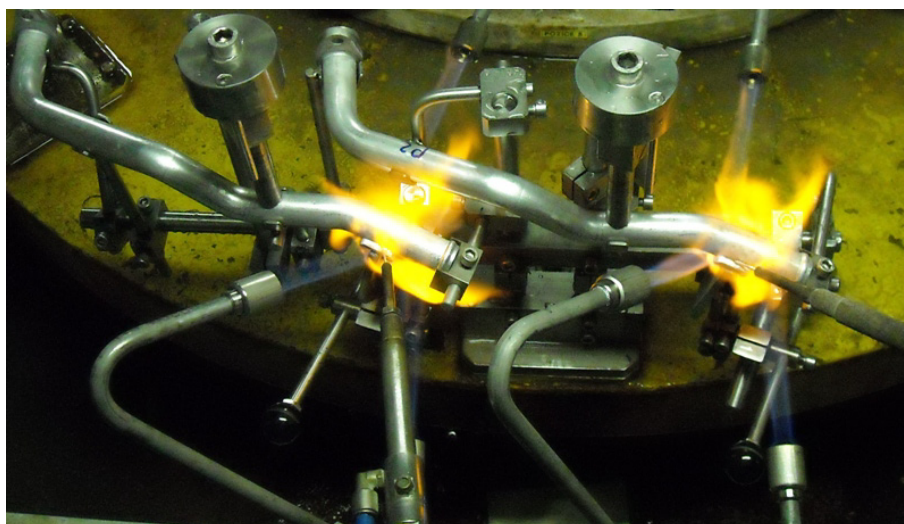
5.3.1 Zkoušky provedené pájením plamenem

Během experimentu bylo provedeno celkem 10 zkoušek pájení vybraného dílu, kde jednotlivé zkoušky proběhly s obměnami různých parametrů a nastavení. Cílem bylo nastavení takových parametrů a nastavení, které pomohly vytvořit vyhovující spoj. Mezi parametry, které ovlivňovaly celkový výsledek pájení byly časy aplikace pájky do místa spoje pomocí podavačů, nastavování poloh hořáků a intenzity plamene při pájení. Pájky se v případě pájení koncovek, aplikovaly ručně do spoje. V tabulce č.15 jsou zaznamenány jednotlivé zkoušky a jejich výsledky. Obrázky č. 35 až 40 znázorňují výsledky posouzení makrostruktur jednotlivých pájených spojů. Následující obrázky popisují výsledky posouzení makrostruktur 3., 6. a 10. zkoušky pájení, které nejlépe znázorňují posun v odladování pájení těchto dílů.

Zkouška č.3 proběhla s nastavováním parametrů a daných hodnot pro experiment. V první fázi proběhlo pájení koncovky na trubku. Založení dílu v přípravku v průběhu experimentu ukazuje obr. 33 a 34.



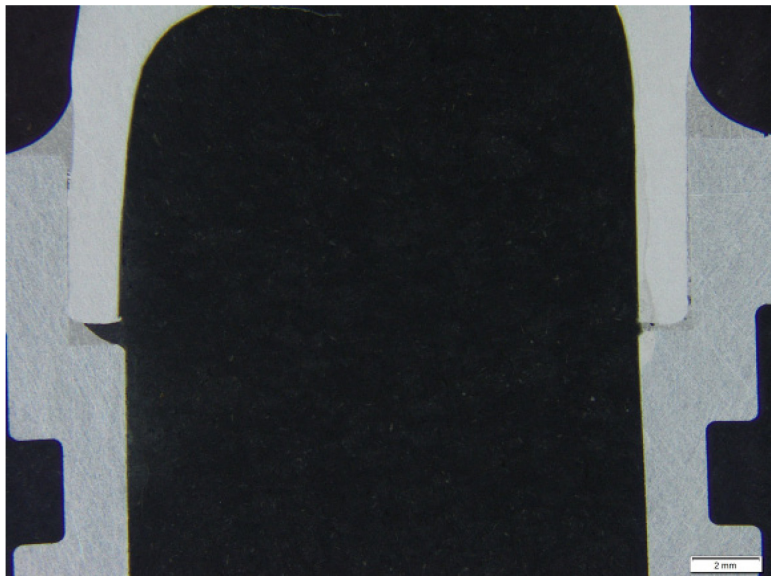
Obr.33 Pozice dílce v pájecím přípravku u pájení koncovky



Obr.34 Založení dílu v přípravku pro pájení držáku.

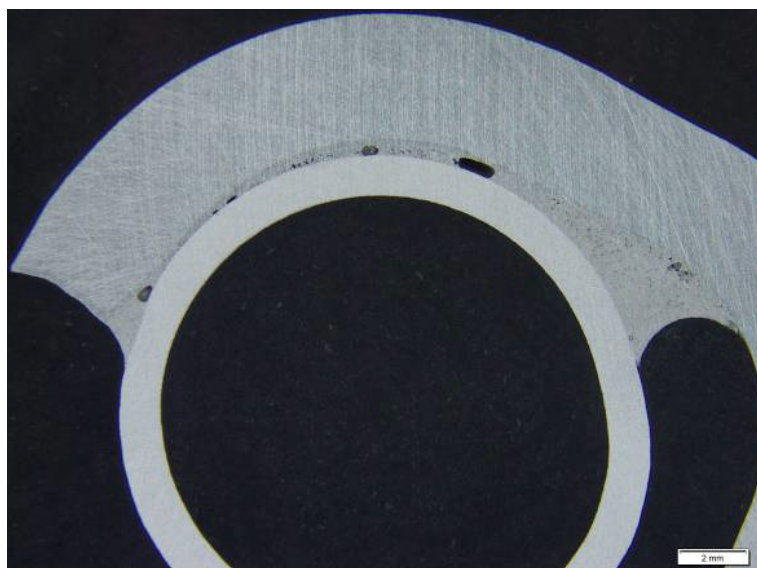
V průběhu zkoušky č.3 byly prováděny zásahy především časového náběhu teploty pájení a nastavování výšky podavačů pájky a také jejich optimální čas při dávkování spoje pájkou.

Výsledek zkoušky č.3 pájené koncovky uvádí obr.35



Obr. 35 Makrostruktura pájeného spoje koncovky řezem u zkoušky č.3 Zv.10x

Výsledek zkoušky č.3 pro pájení držáku na trubku uvádí obr. 36



Obr. 36 Makrostruktura pájeného spoje držáku řezem u zkoušky č.3 Zv.10x

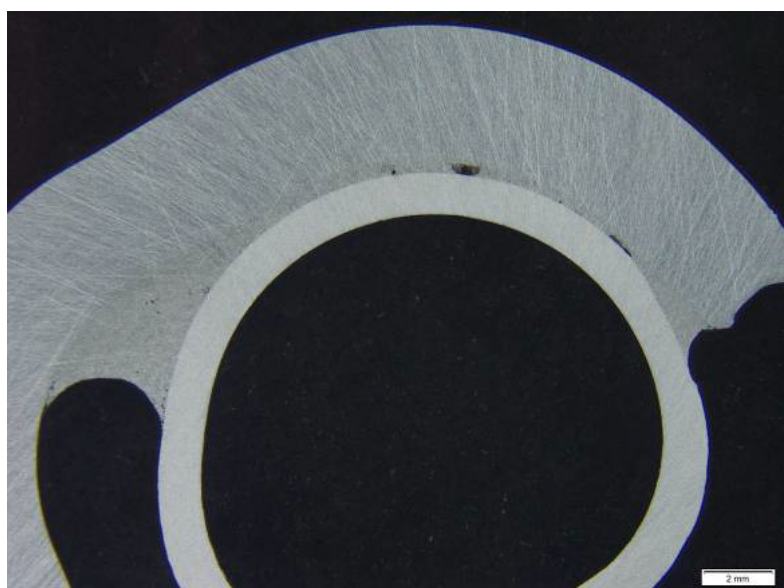
Tab. 12 výsledky zkoušky č.3

Zkouška č.3	zapájená plocha v %
č.1 - koncovka	66,5% - nevyhovuje
č.2 - držák	69,2% - nevyhovuje

Zkouška č.6 byla provedena s nastavením parametrů shodných s první zkouškou s výjimkou času pájení, kde z důvodu nedostatečného zatečení pájky ve spoji byl čas pájení prodloužen. Výsledek zkoušky pájení uvádí obr. 37 a 38.



Obr. 37 Makrostruktura pájeného spoje koncovky řezem u zkoušky č.6 Zv.10x

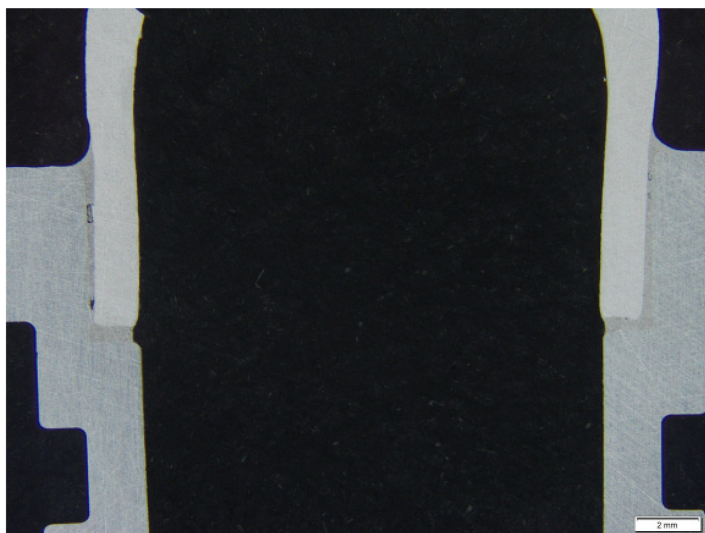


Obr. 38 Makrostruktura pájeného spoje držáku řezem u zkoušky č.6 Zv.10x

Tab. 13 výsledky zkoušky č.6

Zkouška č.6	zapájená plocha v %
č.1 - koncovka	80,8% - vyhovuje
č.2 - držák	86,4% - vyhovuje

Optimalizace parametrů pájení se projevila u zkoušky č.10. Změna byla provedena v rámci zakládání dílu do pájecího přípravku a v časovém příjezdu podavače pájky k pájenému spoji.



Obr. 39 Makrostruktura pájeného spoje koncovky řezem u zkoušky č.10 Zv.10x



Obr. 40 Makrostruktura pájeného spoje držáku řezem u zkoušky č.10 Zv.10x

Tab. 14 výsledky zkoušky č.10

Zkouška č.10	zapájená plocha v %
č.1 - koncovka	86,6% - vyhovuje
č.2 - držák	92,7% - vyhovuje

Tab.15 výsledky jednotlivých zkoušek pájení

číslo zkoušky	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
zapájená plocha koncovky v %	50,4	58,8	66,5	69,8	75,9	80,8	79,6	83,7	86,3	86,6
výsledek pokusu	nevyhovuje	nevyhovuje	nevyhovuje	nevyhovuje	nevyhovuje	vyhovuje	nevyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
zapájená plocha držáku v %	56,8	42,4	69,2	72,6	77,5	86,4	84,3	80,2	85,7	92,7
výsledek pokusu	nevyhovuje	nevyhovuje	nevyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje

Stanovení vyhovujícího či nevyhovujícího spoje jsou dány dle výkresu a jsou v souladu s normou ČSN EN ISO 18279.

- pro vyhovující pájený spoj koncovky je spodní limitní hodnota zapájeného spoje 80% v celém objemu spoje.
- pro vyhovující pájený spoj držáku je spodní limitní hodnota zapájeného spoje 70% v celém objemu spoje.

5.3.2 Vyhodnocení experimentu pájení

Pro provedení experimentu pájení dílců na karuselu Vulkanomat se došlo k závěrům, ze kterých vyplývá jejich použití pro pájení hliníkových trubek na bázi Al-Mg následovně:

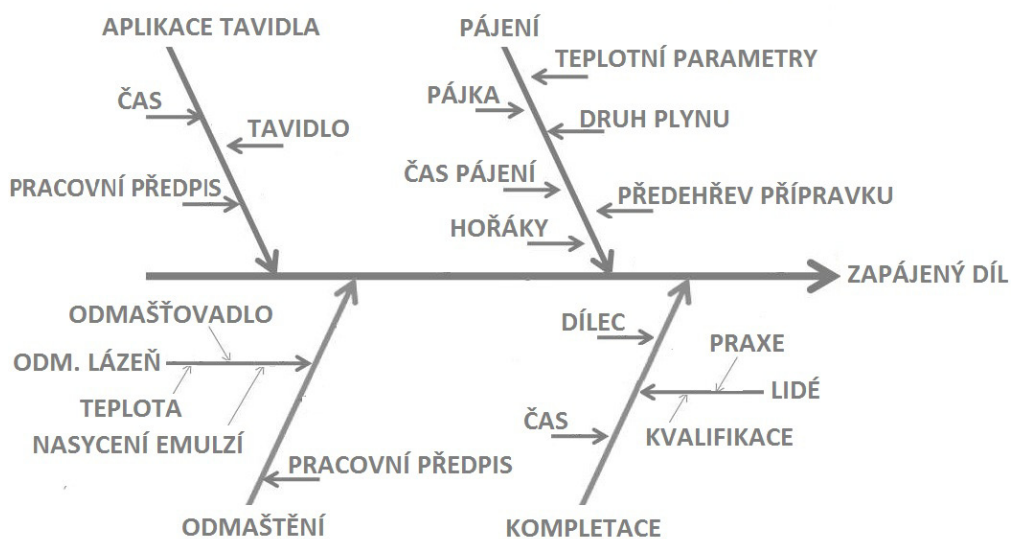
- důležitým faktorem při pájení hliníkových trubek ze slitinou Al-Mg je rychlý a přesný náběh teplot na pájecí teplotu.
- nezbytným předpokladem je dodržení tolerancí konců trubek v rozmezí od 0,175 mm do 0,200 mm a omezení ovalitu dílců z důvodu zabíhavosti pájky do spoje
- správné zakládání dílců do sestavy má zásadní vliv na výsledný pájený spoj
- tavidlo může určitým způsobem ovlivnit kvalitu výsledného spoje a má vliv na procesy, které se odehrávají po očištění dílů po pájení
- zajištění stability a opakovatelnosti procesu je nezbytným předpokladem pro vyhovující spoje
- občasná kolísavost průtoku hořlavého plynu do hořáků může zapůsobit na kvalitu pájeného spoje

6. Návrh snížení zmetkovitosti na projektu V6 TDI

Návrh snížení zmetkovitosti vznikl v souvislosti s náběhem projektu V6 TDI do sériové výroby v oblasti pájení hliníkových slitin báze Al-Mg. Pro návrh snížení zmetkovitosti byla využita metoda statistické regulace. Názorným příkladem pro řešení zmetkovitosti byl rozpad procesu na dílčí hodnoty dle Ishikawova diagramu rybí kosti.

Pro proces pájení projektu V6 TDI byl využit diagram příčin a následků procesu. V procesu pájení lze vysledovat základní příčiny, které se významně podílejí na procesu a lze je rozdělit do 4 skupin:

- odmaštění dílu
- nanášení tavidla
- sestavení dílců do sestavy
- pájení plamenem



Obr. 41 Diagram příčin a následků procesu pájení

6.1. Vliv odmaštění dílců

Základním předpokladem pro úspěšné pájení hliníku a jeho slitin je důkladné odmaštění dílců, které se budou pájet. Důkladně odmaštěný díl se pozná výbornou smáčivostí pájky na povrchu materiálu. Na odmaštění dílců se podílejí další faktory:

- odmašťovací lázeň

Odmašťovací lázeň tvoří základ vyhovujícího odmaštění. K parametrům ovlivňujících odmašťování patří teplota lázně, vhodné odmašťovadlo a vhodné nasycení lázně emulzí. Lázeň by měla být schopna odstranit nečistoty vznikající na dílcích v průběhu operací jako ohýbání a tváření, kde na dílcích zůstává značné množství nečistot.

- technologický postup

Technologický postup stanovuje sled a přesný postup dané operace. V technologickém postupu je nutné dostatečně popsat jak postupovat při jednotlivých úkonech a minimalizovat vliv lidského faktoru na proces.

- odmašťovací zařízení

Jedná se o zařízení, které musí být vybaveno takovým systémem, který umožňuje odmašťovat dílce různých tvarů velikostí a materiálů. Při odmašťování se používá zařízení Atoll 800, které plně vyhovuje požadavkům pro odmašťování hliníkových slitin. Pravidelné kontroly lázně v zařízení tvoří základní předpoklad pro odmaštěný díl připravený pro pájení.

6.2 Vliv aplikace tavidla

Aplikace tavidla do spojů tvoří další možné ovlivnění procesu pájení následovně:

- použitý druh tavidla

Tavidlo AFP Firinit 200 je tavidlo vhodné pro pájení hliníkových slitin. Tavidlo je nutné mít doloženo atestem, který dokládá informace o jeho chemickém složení a chování při pájení. Výběr tavidla proběhl dle dřívějších zkušeností s jeho použitím. Tavidlo je korozivního typu a je nutné po pájení jeho zbytky odstranit. Pokud by neproběhlo odstranění zbytků tavidla po pájení, pájené dílce by mohly být znehodnoceny chemickými látkami v tavidle.

- čas aplikace tavidla ve spoji

Čas aplikace tavidla hraje významnou roli při pájení. Tavidlo AFP Firinit je nutné aplikovat do místa spoje na max. 9 minut, za kterou by měl být dílec zapájen. V případě, že by doba byla delší, je nutné tavidlo odstranit (umýt) a znovu nanést.

6.3 Vliv kompletace dílů před pájením

Vzhledem k odbornosti provádění operace, jsou pracovníci řádně proškoleni a seznámeni s problematikou. Ke snížení vlivu lidského faktoru na proces přispívá videodokumentace kompletace dílů, která má za úkol zajistit minimalizaci chyb při kompletaci dílů do sestavy před pájením.

Časový úsek při kompletaci podléhá předem nastaveným normativům. Významný vliv času při kompletaci je čas aplikace tavidla. Přestože probíhá nanášení tavidla ihned, je možné, že při konci páteční směny a začátkem směny další proběhne delší časový úsek. V tomto případě se jedná o díly, které nebyly zpracovány do konce páteční směny. Tento vliv je eliminován příslušným předpisem dokládajícím nutnost předání dílců na které bylo tavidlo aplikováno k další operaci ke zpracování ve stejný den a v nejkratším časovém úseku.

Při pájení je u sestavy definována určitá tolerance konců trubek, která byla zajištěna kalibrováním konce trubky. Touto cestou bylo zajištěno, že kapilární mezera pro pájený spoj bude ve vhodné toleranci.

6.4. Vliv operace pájení

Mezi vlivy potenciálních problémů při pájení projektu V6 TDI patří:

- pájka
- teplotní parametry
- použitý plyn
- hořáky
- čas pájení
- předehřev přípravku

V rámci problematiky pájení vstupuje do procesu mnoho hodnot, na základě jejich analýzy byl zpracován kontrolní plán zajišťující kontrolu procesu a jeho fungování. Kontrolní

plán byl zpracován na základě interních plánů, PFMEA a FMEA, které předcházejí neshodám procesu a jejich tvorbu provádějí pracovníci technologie ve spolupráci s pracovníky technické kontroly. Při tvorbě byly identifikovány 4 pracovní operace, které mají vliv na kvalitu výsledného dílu a souvisejí s operací pájení.

Tab. 16 Kontrolní plán procesu pájení projektu V6 TDI

Kontrolovaná fáze procesu				Měření		Vyhodnocení			Nápravná opatření	
číslo kroku procesu	parametr	výhovující podmínky	způsob měření	četnost měření	způsob kontroly	signál o překročení požadovaného stavu	odpovědnost za měření	plán reakce na odchylku stavu	odpovědnost za nápravu	
1	koncentrace lázně	předpis na přípravu lázně	předpis na přípravu lázně	1x týdně	zápis ze zkoušky stavu lázně	koncentrace neodpovídá požadavkům předpisu.	pracovník odmašťování	nepokračovat v odmašťování, kontrola všech parametrů ovlivňujících kvalitu lázně, výměna lázně.	technolog	
	čistota	lázeň bez mastnoty	vizuálně	denně	včasná výměna odmašťovací lázně	přítomnost mastných skvrn na hladině lázně.	pracovník odmašťování		technolog	
	teplota	70 °C+/-5°C	teploměrem	denně	Zápis o měření teploty	naměřená teplota je vyšší než 75°C nebo nižší než 70°C.	pracovník odmašťování		technolog	
	operátor	proškolený operátor	zaškolování	zaškolování nových pracovníků s protokolem o školení	dle kontrolního předpisu	nedodržení předpisů	mistr výroby		mistr výroby	
2	sestavení komponent dle pracovní návody	sestaveno podle pracovní návody a etalonu - splněny předepsané rozměry	zástavbové rozměry, srovnání s etalonem	1. kus na začátku směny dle operační kontrolní návody	kontrola práce dle návody 1. kusu pracovníkem kontroly, vzorový kus	nalezena neshoda při kontrole dle návody 1. kusu	kontrola, operátor	kontrola rozměrů všech dílů a dodržení pracovního návody. V případě neshody vyplnit kartu sledování vad	pracovník kontroly, mistr výroby	
3	teplotní parametry	správné teploty předehřevu a pájení na jednotlivých pozicích karuselu.	teplota pájení regulována procesem, kontrola pomocí pyrometrů.	příběžná kontrola hodnot na karuselu, kontrola správné kompletace a základání pracovníkem kontroly	záznamy teplot pájení jsou zaznamenávány	při kontrole před započítím práce zjištěny teploty neodpovídající nastavení	obsluha karuselu, seřizovač	kontrola stavu hodnot na pájecím karuselu.	technolog	
	pájka a tavidlo	pájecí kroužek Al-Si12, Tavidlo AFP Firinit 200	kontrolovat vizuálně	kontrola správné kompletace a základání pracovníkem kontroly	kontrola před započítím práce	nalezena neshoda při kompletaci	pracovník kontroly, operátor		mistr výroby	
	kotla kvality pájeného spoje	vizuálně správně zapájený spoj bez viditelných vad	vizuálně, pomocí mikroskopu		kontrola po zapájení každého celku	protokol s výsledky	obsluha karuselu, pracovník kontroly		technolog	
4	zapájený spoj	není indikována netěsnost	tlačování dle předepsaného programu	100% kontrola	zaznamenáno v kartě sledování vad	podíl dřevých dílů větší než 5% na jednotlivý samostatný projekt	pracovník kontroly	při zvýšení nad 5% kusů na jednotlivý projekt nepokračovat do odstranění problému	pracovník kontroly, technolog	

7. Závěr a zhodnocení dosažených výsledků

Problematika pájení teplených výměníků báze Al-Mg je součástí výzkumu firem, které se zaměřují na výrobu tepelných výměníků jako na hlavní sortiment jejich výrobků. Aplikace hliníkových slitin z pohledu svařování a pájení je stále dosti problematická z důvodů uvedených v diplomové práci. Slitiny báze Al-Mg nacházejí stále větší uplatnění zejména v oblastech chladicích systémů a klimatizací automobilů, díky jejich mimořádným korozním a pevnostním vlastnostem se počítá s jejich vyšším využitím v aplikacích pájení. Budoucnost použití hliníkových slitin se předpokládá v automobilovém a také leteckém průmyslu. V experimentální části práce byl řešen návrh vhodné metody pájení slitin Al-Mg ve velkosériové výrobě automatizovaným procesem pájení plamenem včetně vyhodnocení zkušebních vzorků.. Poslední částí této práce bylo navržení snížení zmetkovitosti využitím metody Ishikawova diagramu (rybí kosti), kde proběhl rozpad operací , které významně ovlivňují proces pájení. Z analýzy byla vysledována kritická místa a na jejich základě byl navržen kontrolní plán, jehož smyslem je udržení stability procesu pájení projektu V6 TDI.

Výsledky této práce jsou již aplikovány ve firmě ZKL Hanušovice, a.s. a vedly ke snižování počtu vadných výrobků daného sortimentu a přispěly ke zvýšení produktivity práce ve firmě. Cenným přínosem této práce pro firmu je zpřehlednění problematiky pájení zejména při nově přijímaných projektech do výroby.

Poděkování

Rád bych učinil poděkování všem, kteří mi byli nápomocní při zpracování této diplomové práce. Tímto děkuji panu doc. Ing. Ivo Hlavatému Ph.D., za odborné vedení, rady a připomínky při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat kolegům a zaměstnancům firmy ZKL Hanušovice, za rady a připomínky ohledně zpracování diplomové práce.

Seznam použitých pramenů:

- [1] ROBERTS, Philip. *Industrial brazing practice*. Boca Raton, Fl.: CRC Press, 2003, 383 p. ISBN 08-493-2112-3.
- [2] ROBERTS, Philip. *Industrial brazing practice*. Second edition. New York: CRC PRESS, 2013, xxvii, 432 pages. ISBN 978-146-6567-740.
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2001, 505 s. ISBN 80-720-4193-2.
- [4] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, c1999, 350 s. ISBN 80-720-4130-4.
- [5] ČSN EN 14324. *Tvrdé pájení: Směrnice pro aplikaci pájených spojů*. Brno: Český normalizační institut, 2005.
- [6] MICHNA, Štefan; LUKÁČ, Ivan; OČENÁŠEK, Vladivoj; KOŘENÝ, Rudolf; DRÁPALA, Jaromír; SCHNEIDER, Heinz; MIŠKUFOVÁ, Andrea. *Encyklopedie hliníku*. Adin, s.r.o., 2005. ISBN 80-89041-88-4. [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <<http://www.ulozto.cz/6300600/michna-encyklopedie-hliniku-pdf>>
- [7] RYCHLÝ, M. *Problémy při tvrdém pájení tepelného výměníku hliníkovou pájkou: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2012, 68 s., Vedoucí práce: Hlavatý, I.
- [8] ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku: Chemické složení a druhy tvářených výrobků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2009. [online]. [cit. 2014-4-14]. Dostupné z: <http://ulozto.cz/xMa5BuQ/csdn-en-573-3-hlinik-a-slitiny-hliniku-chemicke-slozeni-a-druhy-vyrobku-pdf>
- [9] KOUTNÝ, Jiří. Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování [online]. [cit. 2011-11-20]. Dostupné z: <<http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf>>
- [10] DE CARDENAS, Marcello. VERMOTEC. *New Brazing technologies for aluminium direct flow absorbers and collectors*. SMETthermal.St.Ingbert, 2012.
- [11] ROBERTS, Philip. Frequently asked questions: Can aluminium be successfully vacuum brazed?. *EABS* [online]. 2009, č. 1, s. 4 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: www.delphibrazing.co.uk
- [12] SCHWARTZ, Mel M. *Brazing*. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2003. ISBN 978-087-1707-840.

- [13] DRÁPALA, Jaromír. *Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík - příměs: Magnesium, its alloys and Mg - admixture binary systems*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. 172 s. ISBN 80-248-0579-0.
- [14] KOLAŘÍK, Ladislav a Karel KOVANDA. Svařitelnost hliníkových slitin. *Spojování a dělení* [online]. 2011, č. 110436, s. 1 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-hlinikovych-slitin.html>
- [15] *Hliník a jeho slitiny*. 41 s. [online]. [cit. 2014-4-14]. Dostupné z: http://www.benjamin.ic.cz/hlinik_slitiny.pdf
- [16] Brazing Processes [online]. [cit. 2014-01-15]. Dostupné z: <http://machinedesign.com/basics-design/brazing-processes>
- [17] Brazing and soldering machines. [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.fusion-inc.com/automatic-machines/>
- [18] Brazing equipment. [online]. [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://brazesolutions.com/brazing.shtml>
- [19] HATCH, J. E. *Aluminium, Properties and Physical Metallurgy*. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1984
- [20] Brazing Process [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.carbideprocessors.com/pages/brazing-carbide/brazing-process.html>